

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра автоматизованого управління
технологічними процесами
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота (проект)

другий магістерський
(рівень вищої освіти)

на тему Розробка системи дистанційного контролю
зусиль в арматурних каматах системи переднапруження
захисної оболонки на енергоблоках Запорізької АЕС

Виконав: студент 2 курсу, групи 8.1510-3
спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерна - інтегровані технології
(код і назва спеціальності)
спеціалізації _____
(код і назва спеціалізації)

освітньої програми Автоматизація та
комп'ютерна - інтегровані технології
(назва освітньої програми)

К.В. Ковальов
(ініціали та прізвище)

Керівник доцент, доцент К.Т.М. Милейко
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент заст. директора з автоматизації
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

С.В. Албєра - Запорізька Країна
АБ

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
 ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
 ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
 ІМ. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра автоматизованого управління технологічними процесами
 Рівень вищої освіти другий магістерський
 Спеціальність 151 Автоматизовані та комп'ютерно-інтегровані технології
 (код та назва)

Спеціалізація _____
 (код та назва)

Освітня програма Автоматизовані та комп'ютерно-інтегровані технології
 (код та назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри _____

« 26 » листопада 2021 року

ЗАВДАННЯ

НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ (ПРОЄКТ) СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)

Ковальову Костянтину Вікторовичу
 (прізвище, ім'я, по батькові)

1 Тема роботи (проєкту) Розробка системи дистанційного контролю
зусиль в арматурних каналах системи переднапруження
захисної оболонки на енергоблоках Запорізької АЕС
 керівник роботи Мінцільо Н.В., к.т.н., доцент
 (прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом ЗНУ від « 30 » серпня 2021 року № 975-С

2 Строк подання студентом роботи 24.11.2021

3 Вихідні дані до роботи аналіз існуючих систем дистанційного
контролю, технічна документація, дані стримані під
час проходження виробничої практики на ВП Запорізької АЕС

4 Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) Загальна інформація про АЕС; математичне моделювання
стану захисних оболонок енергетичних установок; розробка структурної
схеми технічних засобів системи дистанційного контролю; програмне забезпечення
системи дистанційного контролю зусиль арматурних каналів; техніко-економічне обґрунтування

5 Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

1. Конструкція захисної герметичної оболонки енергоблоку.
2. Система переднапруження захисної оболонки.
3. Різниця вимірних зусиль кожну арматурних каналів.
4. Графік температурної вимірних зусиль від температури.
5. Результати гнелових експериментів.
6. Програма реалізації температурної компенсації.
7. Схема розміщення гірл анкерових пристроїв арматурних каналів.
8. Структурна схема СДКЗ НК СПЗО.
9. Графічний інтерфейс оператора.
10. Техніко-економічне обґрунтування запропонованих рішень

6 Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
1	Міндінко Н.О. доцент	30.06.21	30.07.21
2	Міндінко Н.О. доцент	01.09.21	16.09.21
3	Міндінко Н.О. доцент	17.09.21	12.10.21
4	Міндінко Н.О. доцент	13.10.21	01.11.21
5	Міндінко Н.О. доцент	02.11.21	15.11.21

7 Дата видачі завдання 30.06.2021 р

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Вивчення особливостей експлуатації захисних оболонок енергетичних установок	30.06.21 - 09.07.21	
2.	Аналіз існуючих систем контролю стану захисних оболонок	12.07.21 - 14.07.21	
3.	Розробка математичної моделі температурної компенсації, розробка моделі в середовищі Matlab, проведення системних експериментів	15.07.21 - 30.07.21	
4.	Підбір технічних засобів автоматизації для реалізації системи контролю	01.09.21 - 16.09.21	
5.	Розробка схеми інформаційно-вимірювального каналу	17.09.21 - 28.09.21	
6.	Розробка алгоритму температурної компенсації тепловою регуляцією вимірювальної дроби	29.09.21 - 12.10.21	
7.	Розробка інтерфейсу АРМ оператора	13.10.21 - 18.10.21	
8.	Розрахунок техніко-економічних показників	19.10.21 - 01.11.21	
		02.11.21 - 15.11.21	

Студент

К. Коф
(підпис)К.В. Ковалюк
(ініціали та прізвище)

Керівник роботи (проєкту)

Міндінко
(підпис)Н.О. Міндінко
(ініціали та прізвище)

Нормоконтроль пройдено

Нормоконтролер

Ювіс
(підпис)Т.А. Обгінникова
(ініціали та прізвище)

АНОТАЦІЯ

Ковальов К.В. Розробка системи дистанційного контролю зусиль в арматурних канатах системи переднапруження захисної оболонки на енергоблоках Запорізької АЕС.

Кваліфікаційна робота для здобуття ступеня вищої освіти магістра за спеціальністю 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, науковий керівник Міняйло Н.О. Запорізький національний університет. Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю. М. Потебні, кафедра автоматизованого управління технологічними процесами, 2021.

У роботі проаналізовано технологічний процес роботи атомної електростанції. Досліджено різновиди захисних герметичних оболонок та математичні моделі захисних оболонок. Проаналізовані існуючі системи дистанційного контролю зусиль в арматурних канатах захисної оболонки. Розроблено сучасну систему дистанційного контролю зусиль в арматурних канатах системи переднапруження захисної оболонки.

Ключові слова: захисна оболонка, арматурні канати, система дистанційного контролю, алгоритм, термокомпенсація, технічні засоби.

ABSTRACT

Kovalov K.V. Development of a system of remote control of forces in reinforcing ropes prestressing system of the protective shell on the power units of Zaporizhzhya NPP.

Qualification thesis for a master's degree specializing in "151 – Automation and Computer Integrated Technologies", scientific supervisor Minaiilo N.O. Zaporizhzhia National University. Engineering Educational Scientific Institute in the name of Y.M. Potebni, Department of Automated Control of Technological Processes, 2021.

The work examines the technological process of operations of a nuclear power plant. Varieties of protective shell and mathematical models of protective shell are examined. The current systems of remote control of forces in reinforcing

ropes of the protective shell are reviewed. An up-to-date system of remote control of forces in reinforcing ropes prestressing system of the protective shell is developed.

Key words: protective shell, reinforcing ropes, remote control system, algorithm, thermal compensation, technical means

АННОТАЦИЯ

Ковалев К.В. Разработка системы дистанционного контроля усилий в арматурных канатах системы преднапряжения защитной оболочки на энергоблоках Запорожской АЭС.

Квалификационная работа для получения степени высшего образования магистра по специальности 151 – Автоматизация и компьютерно-интегрированные технологии, научный руководитель Миняйло Н.А. Запорожский Национальный университет. Инженерный учебно-научный институт, кафедра автоматизированного управления технологическими процессами, 2021.

В работе проанализирован технологический процесс работы атомной электростанции. Исследованы разновидности защитных герметичных оболочек и математические модели защитных оболочек. Проанализированы существующие системы дистанционного контроля усилий в арматурных канатах защитной оболочки. Разработана современная система дистанционного контроля усилий в арматурных канатах системы преднапряжения защитной оболочки.

Ключевые слова: защитная оболочка, арматурные канаты, система дистанционного контроля, алгоритм, термокомпенсация, технические средства.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	8
Вступ	9
1 Загальна інформація про АЕС	14
1.1 Технологічна схема та основне обладнання першого контуру реакторної установки ВВЕР-1000	14
1.2 Конструкція і особливості експлуатації захисної оболонки	17
1.2.1 Вимоги до проектування захисних оболонок	17
1.2.2 Типи захисних оболонок	26
1.2.3 Конструкція захисної оболонки на енергоблоках ЗАЕС	30
1.3 Аналіз існуючих систем дистанційного контролю зусиль АК СПЗО	34
1.3.1 Призначення СДКЗ АК СПЗО	34
1.3.2 Технічні засоби автоматизації	35
2 Математичне моделювання стану захисних оболонок енергетичних установок	40
2.1 Аналіз існуючих математичних моделей	40
2.2 Програмна реалізація методу скінченних елементів	45
2.3 Розрахунок коефіцієнтів температурної компенсації у середовищі Matlab та Excel	54
3 Розробка структурної схеми технічних засобів системи дистанційного контролю	64
3.1 Мета та призначення розробки системи дистанційного контролю зусиль в арматурних канатах системи переднапруження захисної оболонки	64
3.2 Вимоги до первинних перетворювачів зусиль. Розробка схеми цифрового тензOMETричного датчика	65
3.3 Розробка пристрою контролю попереднього напруження датчика	70
3.4 Вимоги до температурних датчиків. Вибір датчиків	74
3.5 Проектування каналу передачі даних	75

3.6 Апаратура обробки даних датчиків системи дистанційного контролю зусиль	79
3.7 Розробка схеми живлення СДКЗ	80
3.8 Структура СДКЗ	82
4 Програмне забезпечення системи дистанційного контролю зусиль арматурних канатів	89
4.1 Вимоги до програмного забезпечення СДКЗ АК СПЗО	89
4.2 Програмне забезпечення мікроконтролера цифрового тензометричного датчика	90
4.3 Розробка алгоритму розрахунку зусиль з врахуванням температурної компенсації	91
4.4 Проектування графічного інтерфейсу	94
5 Техніко-економічне обґрунтування запропонованих рішень	98
Висновки.....	102
Список використаних джерел.....	105
Додаток А Схема розміщення арматурних канатів купольної частини захисної оболонки	108
Додаток Б Схема розміщення арматурних канатів циліндричної частини захисної оболонки	109
Додаток В Структурна схема СДКУ-1000	110
Додаток Г Схема розміщення датчиків	111
Додаток Д Структурна схема СДКЗ АК СПЗО	112

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АЕС	атомна електрична станція
АК	арматурний канат
БЖ	блок живлення
ВВЕР	водо-водяний енергетичний реактор
ДД	датчик деформації
ДСТВ	датчик силовимірювальний тензорезисторний
ДП «НАЕК» Енергоатом»	Державне підприємство «Національна атомна енергогенеруюча компанія «Енергоатом»
ВП ЗАЕС	відокремлений підрозділ «Запорізька атомна електрична станція»
ІВК	інформаційно - вимірювальний канал
НДС	напружено-деформований стан
ОС	операційна система
ПЗ	програмне забезпечення
ППЗ	первинний перетворювач зусиль
ППР	планово-попереджувальний ремонт
ПСД-С-У	перетворювач сигналу датчика-струна
ПТК	програмно-технічний комплекс
РУ	реакторна установка
СДКЗ	система дистанційного контролю зусиль
СПЗО	система переднапруження захисної оболонки
СПОД	станція прийому та обробки даних
ТЕП	техніко - економічні показники
ТЗ	технічний засіб
ЦТД	цифровий тензометричний датчик

ВСТУП

Актуальність теми. Атомна енергетика України є базовою галуззю економіки України. Протягом тривалого періоду атомна енергетика забезпечує істотну частину загального виробництва електроенергії в Україні, тому стабільне функціонування атомної енергетики є важливою умовою стабільного розвитку економіки всієї країни.

Атомна енергетика є найбільш оптимальним джерелом отримання електроенергії в зв'язку з тим що при нормальній експлуатації енергоблоків не виникає забруднення атмосфери газами що викликають парниковий ефект, а також іншими газами які призводять до кислотних дощів. Протягом усього часу експлуатації українських атомних станцій вдалося уникнути понад 3 млрд тонн викидів CO₂ у довкілля. Основним недоліком АЕС є ризик виникнення ядерних аварій з викидом радіоактивних речовин в навколишнє середовище, в результаті якого може бути завдано катастрофічних наслідків населенню та природі на великій території. Внаслідок цього розвиток атомної енергетики ставить серйозну проблему запобігання аварій на АЕС при чому пріоритет безпеки повинен бути вищим над економічними і виробничими цілями [1].

У 2020 році частка АЕС у виробленні електроенергії по Україні склала 51,4% або 76,2 млрд кВт-год. За підсумками 2020 року Україна знаходиться на третьому місці у світі за часткою електроенергії АЕС в загальному обсязі виробництва електроенергії в країні, та посідає восьме місце в світі за показником встановленої потужності АЕС [2].

Для забезпечення необхідного рівня безпеки при експлуатації АЕС та створення умов для підвищення ефективності роботи АЕС в єдиній системі енергопостачання народного господарства і населення держави створено Державне підприємство «НАЕК «Енергоатом». Компанія є оператором чотирьох діючих атомних електростанцій України, на яких експлуатується 15 атомних енергоблоків, з яких 13 типу ВВЕР-1000 і два – ВВЕР-440,

загальною встановленою потужністю 13835 МВт, 2 гідроагрегати Ташлицької ГАЕС потужністю 302 МВт та 2 гідроагрегати Олександрівської ГЕС потужністю 11,5 МВт. ДП НАЕК «Енергоатом» забезпечує близько 55% потреби України в електроенергії, в осінньо-зимові періоди цей показник сягає 70% [3].

Розвиток атомної генерації України в період до 2030 р. передбачає підвищення безпеки діючих АЕС; підвищення надійності та ефективності експлуатації діючих АЕС; продовження експлуатації АЕС в понадпроектний термін. На міжнародній конференції «Атомні можливості для розвитку країни» що проходила 22 листопада 2021 року було оголошено що до 2040 року Енергоатом разом із партнерами має завершити спорудження в Україні 14-ти нових атомних енергоблоків.

На діючих АЕС України реалізується ряд програм з підвищення рівня їх експлуатаційної безпеки. Згідно з висновками Держатомрегулювання та міжнародних експертів, на сьогодні він відповідає світовому рівню безпеки АЕС, однак потенціал подальшого підвищення рівня безпеки на вітчизняних АЕС не вичерпано. З метою подальшої реалізації робіт з підвищення безпеки в рамках виконання довгострокової державної стратегії підвищення безпеки енергоблоків АЕС ДП «НАЕК «Енергоатом» та продовження експлуатації енергоблоків, була розроблена Комплексна (зведена) програма підвищення безпеки енергоблоків АЕС України. Одним із заходів, які передбачає Комплексна (зведена) програма підвищення безпеки є оснащення енергоблоків АЕС системами дистанційного контролю зусиль в арматурних канатах системи переднапруження захисної оболонки [4]. Необхідність розробки СДКЗ ґрунтується на практиці проектування закордонних АЕС, досвіді їх використання, а також виконання рекомендацій Міжнародного агентства з атомної енергії (МАГАТЕ) та інших міжнародних організацій щодо підвищення безпеки українських АЕС.

Основні принципи що розроблені в даній роботі можуть бути взяті за основу для виготовлення сучасних систем дистанційного контролю що

будуть встановлені на нових енергоблоках які планують споруджувати в майбутньому.

Система дистанційного контролю забезпечує постійний моніторинг зусиль арматурних канатів та в разі їх пошкодження або виходу за межі встановлених уставок сповіщати про це оператору. Створення архіву зібраних даних за великий проміжок часу дозволяє відстежувати динаміку зміни зусиль натягу арматурних канатів захисної оболонки, оцінювати і прогнозувати загальний стан захисної оболонки та виявляти арматурні канати які підлягають коректуванню їх натягу, ремонту або заміні.

Метою і завданням роботи є розробка та дослідження системи дистанційного контролю зусиль в арматурних канатах системи переднапруження захисної оболонки з метою підвищення безпеки експлуатації АЕС шляхом впровадження моніторингу за динамікою зусиль натягу арматурних канатів, за рахунок сучасних засобів автоматизації та комп'ютерно інтегрованих технологій.

Об'єктом дослідження є система переднапруження захисної оболонки.

Предметом дослідження є система дистанційного контролю зусиль арматурних канатів.

Методи дослідження

1. Метод статистичної обробки даних що були отримані на виробництві.

2. Метод апроксимації функціональної залежності коефіцієнту температурної компенсації виміряних зусиль від температури.

3. Метод імітаційного моделювання.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Встановлено зв'язок теплового розширення вимірювальної ділянки інформаційно-вимірювального каналу на величину виміряних зусиль натягу арматурних канатів.

2. На відміну від існуючих систем вперше введено програмну температурну компенсацію впливу навколишнього середовища на

вимірювальну ділянку інформаційно-вимірювального каналу.

3. Втілено математичний підхід для аналізу стану захисної оболонки до складу якої входять арматурні канати.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Розроблено алгоритм та коефіцієнти температурної компенсації.

2. Запропоновано для системи дистанційного контролю зусиль арматурних канатів використання цифрових тензометричних датчиків. Розроблено функціональну схему цифрового тензометричного датчика.

3. Розроблена структурна схема СДКЗ має три рівня: нижній (силосимірювальні та температурні датчики); середній рівень (контролери, модулі вводу-виводу I-7018, I-7041, I-7510); верхній рівень (станція прийому та обробки даних, АРМ оператора).

4. Для побудови СДКЗ обґрунтовано вибір сучасних технічних засобів автоматизації та методів обробки даних які на відміну від існуючих дозволяють підвищити надійність та точність передачі даних.

5. Розроблені рекомендації щодо розташування температурних датчиків для умов ЗАЕС.

Особистий внесок дослідника. В магістерській роботі узагальнені результати теоретичних та практичних досліджень виконаних автором у інженерному навчально-науковому інституті Запорізького національного університету. Особисто магістром обґрунтовані методи дослідження, поставлені завдання та сформульовані основні висновки. Автором спільно з працівниками ДП «НАЕК «Енергоатом» ВП ЗАЕС виконано збір статистичних даних та проведена обробка експертної інформації. Основні наукові результати роботи отримані магістром самостійно.

Апробація результатів. Основні положення магістерської роботи доповідались на конференції студентів, аспірантів, молодих вчених «Молода наука – 2021» (м. Запоріжжя, ЗНУ, 2021 р.).

Публікації. Результати магістерської роботи опубліковано у тезах доповідей:

1. Ковальов К.В. Захисні оболонки реакторного відділення АЕС як об'єкти автоматизації. Збірник наукових праць студентів, аспірантів, докторантів і молодих вчених «Молода наука - 2021» : у 5 т. / Запоріжжя: ЗНУ, 2021. Т.5. 312 с.

Структура та обсяг магістерської роботи. Робота складається з переліка умовних позначень, вступу, 5 розділів, висновків, 24 використаних джерела. Текст магістерської роботи викладено на 112 сторінках, містить 58 рисунків 10 таблиць, 5 додатків на 5 аркушах.

1 ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО АЕС

1.1 Технологічна схема та основне обладнання першого контуру реакторної установки ВВЕР-1000

Запорізька АЕС - це найбільша атомна електростанція в Європі, розташована на березі Каховського водосховища в Запорізькій області України. Проектна потужність 6000 МВт. На електростанції експлуатується шість енергоблоків по 1000 МВт.

Кожний з шести енергоблоків Запорізької АЕС має наступне основне обладнання:

- водо-водяний енергетичний корпусний реактор типу ВВЕР-1000;
- турбоустановка типу К-1000-60/1500-2;
- генератор типу ТВВ-1000-4.

Проектні техніко-економічні показники електростанції:

- потужність - 6000 МВт;
- річне виробництво електроенергії - 39,0 млрд.кВт.г;
- число годин використання встановленої потужності в рік - 6500 год;
- витрата електроенергії на власні потреби - 5,2%.

Уніфікований моноблок розміщений в окремому головному корпусі АЕС, що складається з реакторного відділення, машинного залу, деаераторної етажерки з приміщеннями електротехнічних пристроїв.

Головні корпуси енергоблоків орієнтовані до ставка охолоджувача - джерела циркулярного водопостачання АЕС. Між ставком-охолоджувачем та головними корпусами енергоблоків розміщені блокові насосні станції, трубопроводи технічного водопостачання і автомобільні дороги.

Зв'язок Запорізької АЕС з єдиною енергетичною системою України здійснюється чотирма лініями електропередач напругою 750 кВ і однією лінією електропередач напругою 330 кВ змінного струму.

Технологічна схема уніфікованої АЕС з реакторною установкою

ВВЕР-1000 двоконтурна.

Перший контур - радіоактивний - включає в себе реактор і чотири циркуляційні петлі, кожна з яких складається з головного циркуляційного насоса, парогенератора і трубопроводів з внутрішнім діаметром 850 мм.

Реактор ВВЕР-1000 є реактором корпусного типу з водою під тиском, яка виконує функцію теплоносія і сповільнювача. Корпус реактора являє собою вертикальну циліндричну ємність високого тиску з кришкою, що має роз'єм з ущільненням і патрубками для входу і виходу теплоносія. Усередині корпусу закріплена шахта, яка є опорою для активної зони і служить для організації внутрішніх потоків теплоносія.

Активна зона реактора зібрана з шестигранних тепловиділяючих збірок (ТВЗ) касетного типу. Тепловиділяючі елементи (ТВЕЛ) в збірці розміщені по трикутній решітці з кроком 12,76 мм. Діаметр твела - 9,1 мм, діаметр паливних таблеток - 7,53 мм, маса завантаження природного урану 66 т, збагачення ^{235}U до 3-4 %. Одна тепловиділяюча збірка містить 317 ТВЕЛів і 12 напрямних стрижнів регулювання. Кількість ТВЗ в активній зоні - 163, з них з регулюючими стрижнями - 61.

Заміна вигорілих касет проводиться на зупиненому розущільненому реакторі. Щорічно проводиться заміна 1/3 робочих касет. Теплоносій надходить в реактор через вхідні патрубки корпусу, проходить вниз по кільцевому зазору між шахтою і корпусом, потім через отвори в опорній конструкції шахти піднімається вгору через ТВЗ. Нагрітий теплоносій з головок ТВЗ потрапляє в міжтрубний простір блоку захисних труб і через перфоровану частину блоку і шахти відводиться з реактора в парогенератор (ПГ), в якому здійснюється енергетичний зв'язок першого і другого контурів.

Тип парогенератора ПГ-1000 - горизонтальний однокорпусний з зануреною поверхнею теплообміну з горизонтальним розташуванням. ПГ складається з наступних основних вузлів: корпусу, колектору роздачі основної живильної води, пристрою роздачі аварійної живильної води, теплообмінної поверхні і колектору першого контуру, сепараційного

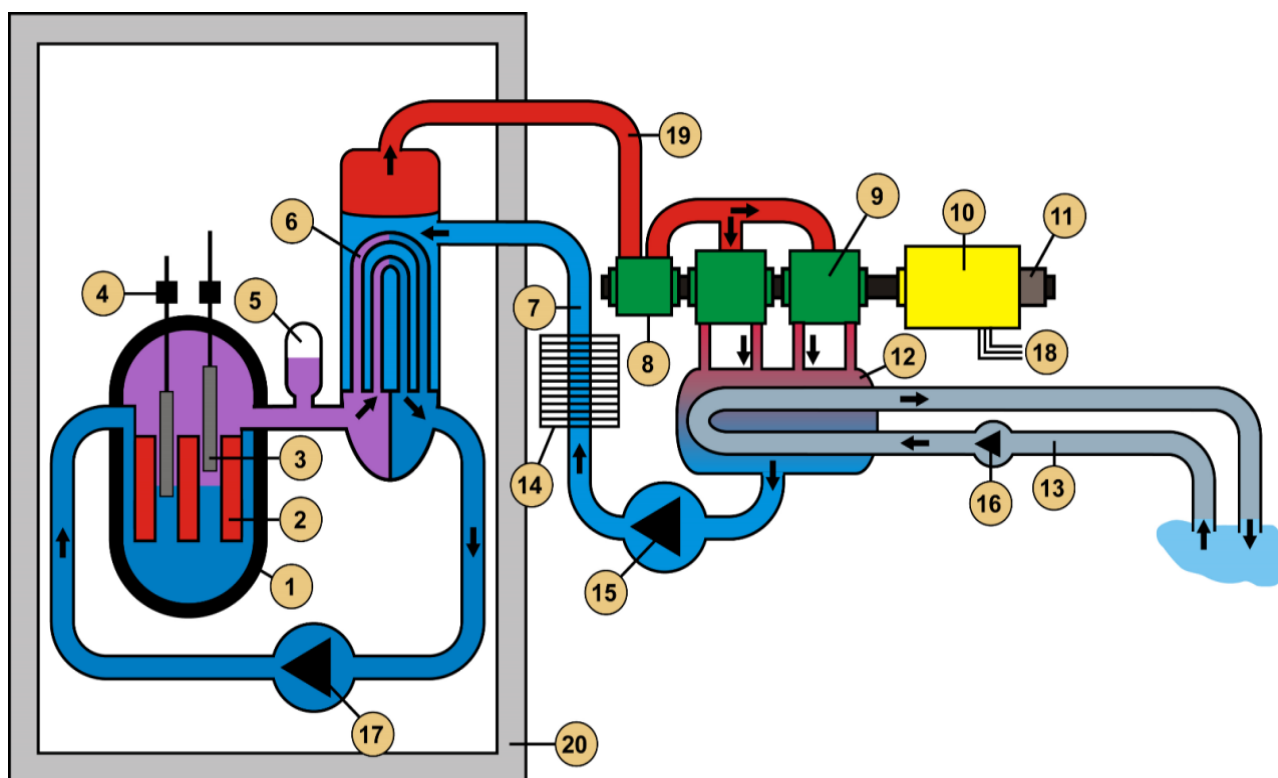
пристрою, пристрою вирівнювання парового навантаження, опорних конструкцій зрівняльних посудів, гідроамортизаторів. У першому контурі використовуються відцентрові циркуляційні насоси ГЦН 195М продуктивністю 20000 м³/год, що володіють підвищеною механічною енергією завдяки встановленому маховику. Це забезпечує надійне охолодження активної зони в нормальних, перехідних і аварійних режимах.

Для створення необхідного тиску потрібне спеціальне зовнішнє джерело, яким є паровий компенсатор тиску. Він служить для компенсації зміни об'єму теплоносія при нагріванні його в контурі і створенні початкового тиску. Компенсатор тиску приєднаний до однієї з петель головного циркуляційного контуру.

Другий контур - нерадіоактивний - складається з парогенеруючої частини парогенераторів, турбіни і допоміжного обладнання машинного відділення. На енергоблоках електростанції встановлені турбіни К-1000-60/1500-2 з генераторами ТВВ-1000-4.

Турбіна призначена для перетворення теплової енергії пари в механічну енергію обертання роторів. Турбіна потужністю 1000 МВт працює на насиченій парі під тиском 6 МПа, має два циліндри високого (ЦВТ) і три циліндри низького тиску (ЦНТ). Проміжне осушення і перегрівання пари після ЦВТ здійснюється в чотирьох сепараторах-пароперегрівачах. Турбінний конденсат піддається очищенню блоковою знесолювальною установкою і через підігрівачі низького тиску системи регенерації надходить в деаератори під тиском 0,7 МПа. Після деаераторів і підігрівачів високого тиску вода двома живильними турбонасосами подається в парогенератори. До схеми другого контуру входить бойлерна установка для опалення будівель промислового майданчика і міста супутника АЕС. Продуктивність бойлерної установки 840 ГДж/год. [5-7]

Схема енергоблоку з водо-водяним реактором ВВЕР-1000 представлена на рисунку 1.1.



1 – реактор; 2 – паливо; 3 – керуючі стрижні; 4 – приводи СУЗ; 5 – компенсатор тиску; 6 – теплообмінні трубки парогенератора; 7 – подача води до парогенератора; 8 – циліндр високого тиску турбіни; 9 – циліндр низького тиску турбіни; 10 – генератор; 11 – збудник; 12 – конденсатор; 13 – система охолодження конденсаторів турбіни; 14 – підігрівачі; 15 – ТПН; 16 – циркуляційний насос; 17 – головний циркуляційний насос; 18 – підключення генератора до мережі; 19 – подача пару на турбіну; 20 – захисна герметична оболонка реакторного відділення.

Рисунок 1.1 - Схема енергоблоку з водо-водяним реактором ВВЕР-1000

1.2 Конструкція і особливості експлуатації захисної оболонки.

1.2.1 Вимоги до проектування захисних оболонок

При проектуванні будівництва АЕС слід спиратися на міжнародні стандарти МАГАТЕ, що застосовуються до проектування атомних електростанцій, встановлюють цілі безпеки, принципи та концепції безпеки, які є основою для визначення вимог безпеки, які повинні відповідати при проектуванні атомної електростанції. Даними стандартами повинні

користуватися організації, які займаються проєктуванням, виготовленням, будівництвом, модифікацією, обслуговуванням, експлуатацією та виведенням з експлуатації атомних електростанцій.

В розділі серії стандартів безпеки МАГАТЕ № SSR-2/1 «Безпека атомних електростанцій: проєктування» [8] зазначено застосування основних технічних вимог, що до конструкції захисної оболонки та пов'язаних з нею систем на які покладено наступні функції безпеки:

- утримання радіоактивних речовин в робочому стані та в умовах аварії;
- захист реактора від зовнішніх природних подій і антропогенних факторів;
- захист від радіації в робочих станах та в умовах аварії.

Умови, за яких мають виконуватися ці функції безпеки, необхідно ідентифікувати та охарактеризувати для визначення різних елементів проєктних основ відповідних конструкцій, систем і компонентів.

1. Обмеження радіоактивного матеріалу.

Конструкція захисної оболонки повинна бути такою, щоб будь-який радіоактивний викид з атомної електростанції в навколишнє середовище був настільки низьким, наскільки це можливо бути досяжним, межі скидів були нижче дозволених в робочих станах і нижче допустимих меж в умовах аварії». Для експлуатаційних станів очікується річна доза, яку отримують люди, що проживають поблизу ядерної установки, буде порівнянною з ефективною дозою через природний фоновий рівень радіації (тобто рівні, які спочатку існували на об'єкті). Для опромінення населення в ситуаціях запланованого опромінення запропонований діапазон значень обмеження дози, зазначений у серії стандартів безпеки МАГАТЕ (радіаційний захист та безпека джерел радіації): міжнародні основні стандарти безпеки, допускають збільшення на 1 мЗв на рік порівняно з отриманою дозою від опромінення через природні джерела радіації. Підхід до радіоактивних викидів в умовах аварії має бути таким:

- для проєктних аварій та умов без значної деградації палива викиди зведені до мінімуму, так що захисні дії за межами майданчика (наприклад, евакуація, укриття, блокування щитовидної залози йодом) не потрібні;

- для умов з оплавленням активної зони викиди зведені до мінімуму таким чином, що необхідні лише захисні дії за межами майданчика, обмежені за тривалістю часу та областями застосування, і для вжиття таких заходів має бути достатньо часу;

- послідовності аварій, які можуть призвести до раннього радіоактивного викиду або великого радіоактивного викиду, «практично усуваються» відповідними проєктними положеннями;

- захисна оболонка та пов'язані з нею системи сконструйовані таким чином, щоб будь-який радіоактивний викид був настільки низьким, наскільки це можливо бути досяжним, та було нижчим за дозволені межі викидів в експлуатаційних станах і нижче допустимих меж в умовах аварії.

Герметичність захисної оболонки є важливою для утримання радіоактивного матеріалу та мінімізації радіоактивних викидів. Герметичність, як правило, характеризується заданими максимальними показниками витоку (загальна швидкість витоку та специфічні показники витоку для проникнення в герметичній ємності, повітряних шлюзів, люків і ізоляційних клапанів герметичності), які не очікуються перевищувати в умовах аварії. Обладнання, призначене для забезпечення виконання функцій захисної оболонки, має бути спроектовано та кваліфіковане для забезпечення збереження цілісності та герметичності під час переважних умов навколишнього середовища, в яких експлуатується обладнання.

Ізоляція захисної оболонки необхідна для обмеження радіоактивних викидів в атмосферу з захисної оболонки, викликаних умовами аварії. Системи, призначені для забезпечення того, щоб задані проєктні межі герметичності по відношенню до тиску, температури та горючих газів не були перевищені, необхідно впроваджувати, якщо це необхідно, для збереження цілісності конструкцій захисної оболонки в умовах аварії. Для

відведення тепла від захисної оболонки в умовах аварії необхідно застосувати кілька засобів. Системи, спеціально призначені для вирішення умов розширення проєкту з плавленням активної зони, повинні бути незалежними від систем безпеки.

В аварійних умовах, які можуть поставити під загрозу цілісність та герметичність конструкції захисної оболонки, повинні бути усунені за допомогою включення відповідних елементів, які гарантують, що ймовірність таких явищ може вважатися «практично усунутими».

2. Захист від зовнішніх і внутрішніх небезпек.

Відповідно до вимоги 17 SSR-2/1, герметична оболонка або захисна конструкція повинні бути спроектовані для захисту об'єктів, важливих для безпеки, розміщених у захисній оболонці, від впливу природних і спричинених людиною зовнішніх небезпек, визначених оцінкою безпеки для об'єкта, а також від впливу внутрішніх небезпек, що виникають від обладнання, встановленого на об'єкті. Слід враховувати причинно-наслідкові причини та ймовірність поєднання небезпек.

Захисна оболонка або захисна конструкція також забезпечує захист від наслідків можливих зловмисних дій, спрямованих проти об'єкта. Рекомендації та вказівки щодо заходів безпеки надаються в публікаціях серії МАГАТЕ з ядерної безпеки.

3. Радіаційний захист

В експлуатаційних станах та в умовах аварії захисна оболонка сприяє захисту персоналу станції та населення від надмірного впливу прямого випромінювання радіоактивного матеріалу всередині захисної оболонки. Склад і товщина бетону, сталі та інших матеріалів повинні бути такими, щоб дози опромінення для працівників станції та населення не перевищували межі доз, щоб вони залишалися на мінімально досяжному рівні в експлуатаційних станах протягом усього терміну експлуатації станції, і щоб вони залишалися нижче допустимих меж і на розумно досяжному низькому рівні в аварійних умовах та після них.

4. Основи проектування конструкції захисної оболонки, її компонентів та пов'язаних систем.

При проектуванні захисної оболонки та пов'язаних з нею систем треба враховувати вимоги, рекомендації та вказівки щодо безпеки та захисту. Заходи безпеки та заходи захисту слід розробляти та застосовувати комплексно згідно рекомендації щодо фізичного захисту ядерного матеріалу та ядерних установок наведених в серії МАГАТЕ з ядерної безпеки № 13.

В проєктних основах захисної оболонки та пов'язаних з нею систем слід враховувати всі можливі стани в яких може знаходитись станції (тобто будь-які умови, що виникають під час нормальної експлуатації, при порушеннях нормальної експлуатації, проєктних аваріях та запроєктних аваріях). Комбінації навантажень, створені внутрішніми та зовнішніми небезпеками, також повинні бути включені в основу проектування відповідних конструкцій, систем і компонентів. Проєктні умови та розрахункові навантаження слід розраховувати з урахуванням граничних умов, визначених для кожного з відповідних станів або небезпек. Необхідні характеристики конструкцій, систем і компонентів для експлуатаційних станів слід визначати на основі наступних потреб:

- обмежувати радіоактивний матеріал;
- мінімізувати радіоактивні викиди;
- сприяти захисту від радіації;
- підтримувати тиск і температуру в межах, визначених для робочих станів;
- створювати та підтримувати належні екологічні умови на робочих місцях;
- забезпечувати необхідний доступ персоналу та переміщення матеріалів;
- проводити випробування конструкції захисної оболонки та герметичності;

- пристосування до навантажень, які виникають під час експлуатаційних перехідних процесів (наприклад, навантаження через диференціальне теплове розширення та зміну зовнішньої температури навколишнього середовища).

5. Постульовані ініціативні події

Постульовані ініціативні події, що мають відношення до захисної оболонки та пов'язаних з нею систем, повинні включати відмови обладнання та помилки, які потенційно можуть призвести до умов аварії зі значним викидом радіоактивного матеріалу або зі значним викидом маси та енергії всередині захисної оболонки. Також слід враховувати постульовані початкові події, що відбуваються в режимах зупинки реакторної установки з відкритою захисною оболонкою або коли деякі системи відключені для технічного обслуговування.

При проєктуванні захисної оболонки та пов'язаних з нею систем слід враховувати наступні постульовані початкові події:

- великі, середні та малі розриви в системі теплоносія реактора;
- великі, середні та малі перерви в головній системі пари або живильної води;
- несправність обладнання в системах, що призначенні для переносу радіоактивних рідин або газів у межах захисної оболонки;
- аварії при поводженням з ядерним паливом всередині захисної оболонки.

При проєктуванні слід враховувати внутрішні небезпеки, які можуть поставити під загрозу роботу захисної оболонки та пов'язаних з нею систем. Нижче наведено список внутрішніх небезпек, які зазвичай необхідно враховувати. Цей перелік слід доповнювати за необхідності, щоб включити конкретні небезпеки, що стосуються конструкції:

- поломки в системах високої енергії, розташованих всередині захисної оболонки або всередині будівель, в яких розміщені системи, для пом'якшення наслідків аварії;

- поломки в системах або компонентах, що містять радіоактивний матеріал, розташованих у захисній оболонці;
- несправність обладнання для транспортування палива;
- падіння важких вантажів;
- пожежі та вибухи;
- повінь.

6. Зовнішні небезпеки

Рекомендації щодо типових зовнішніх небезпек та їх комбінацій, які зазвичай необхідно враховувати, наведені в стандартах безпеки МАГАТЕ щодо сейсмічного проєктування та атестації для АС. Перелік зовнішніх небезпек слід адаптувати або доповнювати, якщо це необхідно, щоб включити небезпеки, характерні для об'єкта.

Захисна оболонка та будівлі, в яких розміщені системи для пом'якшення наслідків аварії, повинні бути спроектовані таким чином, щоб витримувати навантаження, викликані зовнішніми небезпеками, та захищені від будь-яких впливів, спричинених сусідніми будівлями, які не спроектовані для того, щоб витримувати навантаження від зовнішніх небезпек.

Системи які необхідні для вивільнення маси та енергії та управління ними, контролю радіоактивних викидів та поводження з горючими газами в аварійних умовах, повинні бути захищені від впливу зовнішніх небезпек або бути спроектовані так, щоб витримувати навантаження, викликані зовнішніми небезпеками. Для кожної небезпеки всі компоненти, які повинні зберігати свою працездатність або цілісність під час або після небезпеки, повинні бути ідентифіковані та зазначені в проєктних основах компонента.

7. Випробування та перевірки

Щоб продемонструвати, що захисна оболонка та пов'язані з нею системи відповідають вимогам проєктування та безпеки, випробування та перевірки повинні виконуватися в процесі будівництва, вводі в експлуатацію та під час експлуатації згідно з перевіреними нормами та стандартами з урахуванням чинних у рекомендацій. Слід також розглянути рекомендації,

що містяться в серіях стандартів безпеки МАГАТЭ з технічного обслуговування, контролю та інспекцій на атомних електростанціях.

8. Перевірки під час будівництва

Перевірки повинні проводитися на різних етапах будівництва, щоб забезпечити відповідність проєкту та будівельним специфікаціям. Недоліки, відхилення від стандартів та невідповідності слід відстежувати та повідомляти. Нижче наведені типові приклади конструкцій, систем і компонентів, які підлягають перевірці під час будівництва:

- Вертикальна зона кріплення арматурних канатів;
- Встановлення фундаментної арматури та бетонні роботи;
- горизонтальна зона кріплення арматурних канатів;
- встановлення каналотворювачів;
- облицювання сталлю внутрішньої сторони гермооболонки;
- розташування арматури навколо великих отворів.

Будівельні роботи та перевірки повинні виконуватися кваліфікованим персоналом.

9. Експлуатаційні тести

Випробування захисної оболонки та пов'язаних з нею систем повинні бути виконані до першого пуску реактора, щоб продемонструвати цілісність конструкції захисної оболонки, визначити швидкість витоку з оболонки контейнменту та підтвердити роботу систем та обладнання.

Перевірка цілісності конструкції. Необхідно провести випробування під тиском, щоб продемонструвати структурну цілісність захисної оболонки, оболонки та межі утримання тиску відповідних систем. Випробування під тиском слід проводити при визначеному тиску, який є принаймні розрахунковим, і для якого враховуються застосовні норми для використовуваних матеріалів. Температура випробування не повинна бути близькою до температури пластично крихкого переходу для металевих матеріалів. Необхідно провести комплексне випробування швидкості витоку, щоб продемонструвати, що швидкість витоку захисної оболонки не

перевищує зазначену максимальну швидкість витoku. Випробування слід проводити з компонентами в стані, що відповідає умовам, які переважали б в умовах аварії, щоб продемонструвати, що зазначена швидкість витoku не буде перевищена за таких умов.

Місцеві випробування швидкості витoku повинні бути виконані для встановлення базового вимірювання витoku для кожного ізолюючого пристрою, повітряного шлюзу та проходок. Наступні компоненти є найбільш чутливими частинами захисної оболонки, і їм слід звернути особливу увагу:

- повітряні затвори;
- обладнання повітряних шлюзів;
- люки для обладнання;
- труба передачі палива;
- запасні проходки;
- кабельні проходки з пружними ущільненнями;
- трубні проходки з гнучкими розширювальними сільфонами в з'єднаннях із захисною оболонкою.

Конструкція повинна дозволяти проводити випробування на герметичність ізоляційних пристроїв, повітряних шлюзів і проходок. Конструкція повинна сприяти локальному випробуванню, забезпечуючи доступ до проходок і включаючи необхідні з'єднання та ізоляційні клапани. Щоб забезпечити більшу точність у вимірюванні швидкості витoku та покращити виявлення негерметичних клапанів, має бути забезпечена можливість тестування окремих клапанів.

Необхідно провести функціональні випробування обладнання та електропроводки в захисній камері, щоб переконатися, що робота пов'язаних систем відповідає проєктним специфікаціям. Необхідно провести випробування всієї електричної проводки відповідних систем, щоб продемонструвати, що немає відхилень від проєкту та що всі з'єднання відповідають проєкту.

10. Візуальний огляд

Візуальний огляд є важливим для моніторингу та виявлення наслідків старіння, а також для виявлення тріщин та моніторингу їх розвитку. Візуальний огляд може доповнити результати моніторингу конструкції та приладів. Там, де це технічно можливо, проєкт повинен передбачати повну візуальну перевірку захисних конструкцій (включаючи арматуру для попередньо напружених бетонних оболонок), проходок та ізоляційних пристроїв. Необхідно використовувати техніку візуального контролю, яка спеціально кваліфікована для виявлення типу та розміру тріщин та інших дефектів, які, як визначено, мають значення для витоку та цілісності конструкції.

Механізми старіння, що впливають на захисну оболонку та пов'язані з нею системи, повинні бути ідентифіковані, враховані при розробці та включені в програму управління старінням. Захисна оболонка може піддаватися декільком явищам старіння, таким як корозія металевих компонентів, текучість арматурних канатів і зменшення напруження в попередньо напруженій захисній оболонці, зниження пружності еластичних ущільнень, усадка і розтріскування бетону.

Можлива втрата попереднього напруження або розрив арматурних канатів захисної оболонки протягом терміну експлуатації АС повинні бути оцінені та враховані в проєкті.

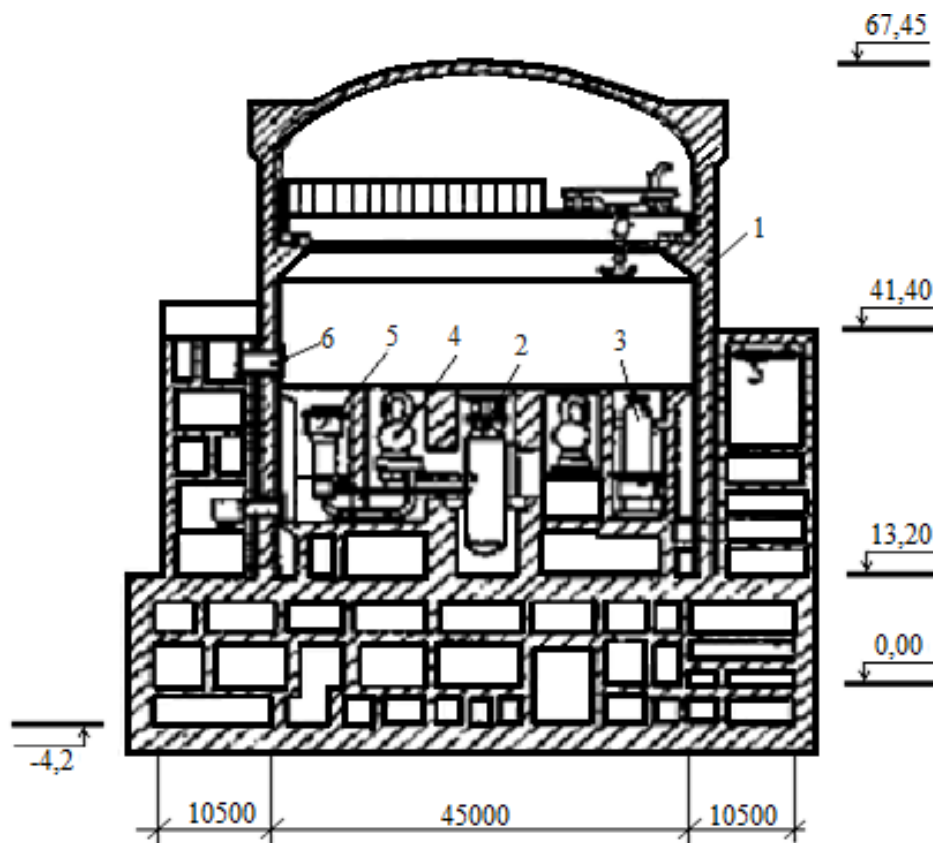
1.2.2 Типи захисних оболонок

При будівництві атомних електростанцій найбільш конструктивно складним, матеріаломістким і трудомістким є реакторне відділення і особливо зона локалізації можливих аварій - захисна оболонка і конструкції всередині нього. Захисна оболонка (герметична оболонка; контайнмент – від англ. containment) є пасивною системою безпеки енергетичних ядерних реакторів, основною функцією якої є запобігання викиду радіоактивних речовин в навколишнє середовище при виникненні проєктних та

запроектних аварій. Захисна оболонка є найважливішою з точки зору безпеки АЕС вона є останнім фізичним бар'єром на шляху розповсюдження радіоактивних матеріалів та іонізуючого випромінювання. Крім того, оболонка захищає реакторну установку від зовнішніх впливів, таких як землетруси, урагани, вибухи, падіння літаків.

Для кожного енергоблоку АЕС споруджується окремий головний корпус. Все обладнання першого контуру реакторної установки, а також спеціальні технологічні системи (системи безпеки і допоміжні системи) розташовані в реакторному відділенні енергоблоку, який є спорудою спеціальної конструкції.

Реакторне відділення складається з герметичної і негерметичної частин (рисунок 1.2). Герметичну частину, зазвичай називають гермооболонкою, де розташоване обладнання першого контуру і реактор.



1- захисна герметична оболонка; 2 - реактор; 3 - компенсатор об'єму; 4 - парогенератор; 5- головний циркуляційний насос; 6 - шлюз.

Рисунок 1.2 – Схема розміщення основного обладнання першого контуру в одинарній захисній оболонці реакторного відділення

Практично всі енергоблоки, які будувалися на протязі останніх десятиліть оснащені захисною оболонкою. Компановано-конструктивні рішення, форма, розміри оболонок залежать від деяких факторів, до яких можна віднести наступні:

- тип, потужність реактору;
- технологічна схема АЕС;
- спосіб зниження тиску всередині оболонки при аваріях;
- вимоги по безпеці національних органів та МАГАТЕ.

З урахуванням даних факторів конструкцій оболонок може сильно відрізнятись. Більшість сучасних контейментів (близько 95%) – оболонкові споруди різного розміру з залізобетону, частіше за все циліндричної форми.

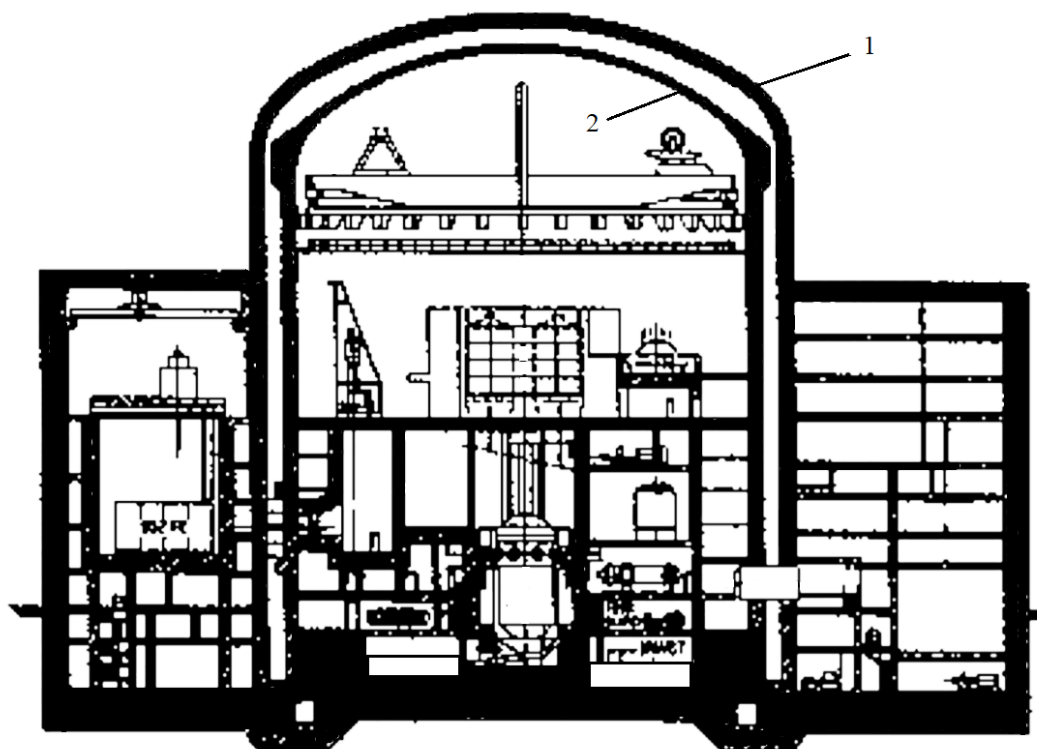
При будівництві АЕС найбільш розповсюджене використання вододіючих реакторів (більш 50% від загальної кількості). При цьому використовуються наступні рішення:

– Одинарні залізобетонні переднапружені циліндричні оболонки з пологим сферичним або еліпсоїдним куполом (та карнизною частиною), а також з напівсферичним куполом (рисунок 1.2). Діаметр при потужності реактору 900...1000 МВт – 40...45м, висота 60...70 м, товщина до 2000 мм. Всередині оболонка в більшості випадків має сталю герметизуючу облицьовку.

– Подвійні (двохбар'єрні) циліндричні залізобетонні оболонки з пологим сферичним та напівсферичним куполом (зовнішня оболонка) на загальній залізобетонній плиті (рисунок 1.3). Рішення та розміри внутрішньої оболонки аналогічні одинарній. Зовнішня оболонка розраховується на зовнішні впливи, виконується без попереднього напруження та має товщину 500...800мм при діаметрі до 55м і висоті до 80м (потужність реактора 900...1500 МВт). Основне призначення внутрішньої оболонки стримати радіоактивні парогазові та аерозольні продукти аварії при розрахунковому тиску (в залежності від особливостей АЕС до 0,4...0,5 МПа). Ширина повітряного зазору між оболонками 1,5...2,0м. В зазорі системою вентиляції

підтримується тиск нижче атмосферного. В ньому збираються та відводяться на фільтри газові протічки з внутрішньої оболонки.

Подвійні оболонки є більш надійними, ніж одинарні, та в теперішній час при будівництві АЕС застосовуються переважно двобар'єрні залізобетонні оболонки. При цьому внутрішня оболонка розраховується на підвищений тиск при аварії, та для запобігання розкриття тріщин і виходу газоподібних радіоактивних продуктів виконується з попереднім напруженням.



1 – Зовнішня оболонка, 2 – внутрішня оболонка.

Рисунок 1.3 – Реакторне відділення з подвійною захисною оболонкою

Напружені пучки арматурних канатів протягують всередині металевих або полімерних каналоутворювачів, закладних в бетон. Для циліндричних з куполом оболонок мають місце гелікоїдальна і ортогональна схеми розташування каналоутворювачів. Зовнішня залізобетонна оболонка призначена для захисту реакторних установок від зовнішніх небезпек.

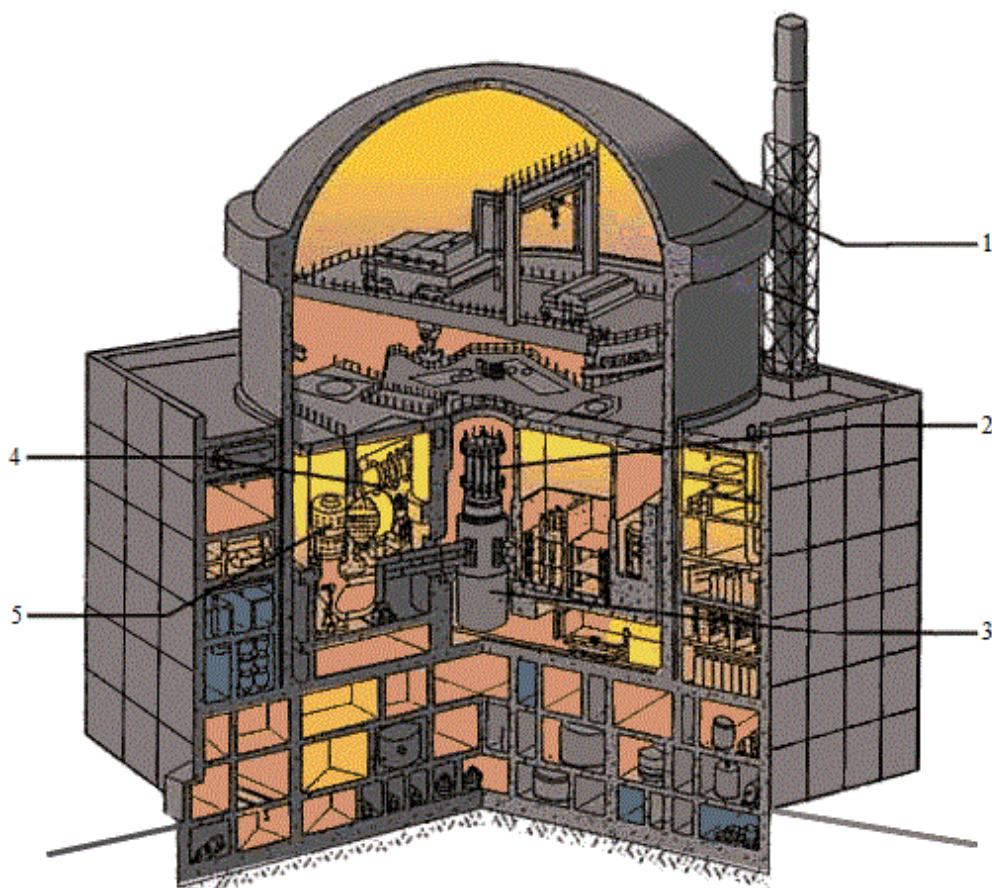
– Подвійні оболонки з металу та залізобетону. Зовнішня – залізобетонна циліндрична оболонка з напівсферичним куполом. Діаметр та

висота близько 60м, товщина 1800...2000мм (потужність реактору 1200...1300 МВт). Внутрішня стальна сферична – діаметром до 55...60м при товщині 30...40мм. Нижня частина сфери вбудована в залізобетонні конструкції фундаментної частини.

Довгий час питання про доцільність будівництва захисних оболонок над реакторними відділеннями залишався дискусійним. Однак декілька аварій в США в 1960-х – 1970-х рр. стали переконливим доводом на користь будівництва контайнерів. [9-11]

1.2.3 Конструкція захисної оболонки на енергоблоках ЗАЕС

Захисна герметична оболонка реакторного відділення Запорізької АЕС (рисунок 1.4) має форму циліндра, який сполучений з пологим куполом та днищем. Під днищем розташований цокольний поверх.



1 – Купол захисної оболонки; 2 – верхній блок реактора; 3 – реактор;
4 – парогенератор; 5 – головний циркуляційний насос.

Рисунок 1.4 – Реакторне відділення Запорізької АЕС

Внутрішній діаметр оболонки дорівнює відповідно 45 м; висота 52 м від позначки 13,2 метра над рівнем землі, де розташоване його дно, до позначки 67,45 м, де розташована верхівка її куполоподібного верху. Товщина стінки циліндра та куполу складає відповідно 1200 мм та 1000мм. Конструкція захисної оболонки (рисунок 1.5) виконана з монолітного попередньо напруженого залізобетону з внутрішньої сторони облицьована сталлю завтовшки 6 мм. Загальний об'єм захисної оболонки 67000 м³ [12].

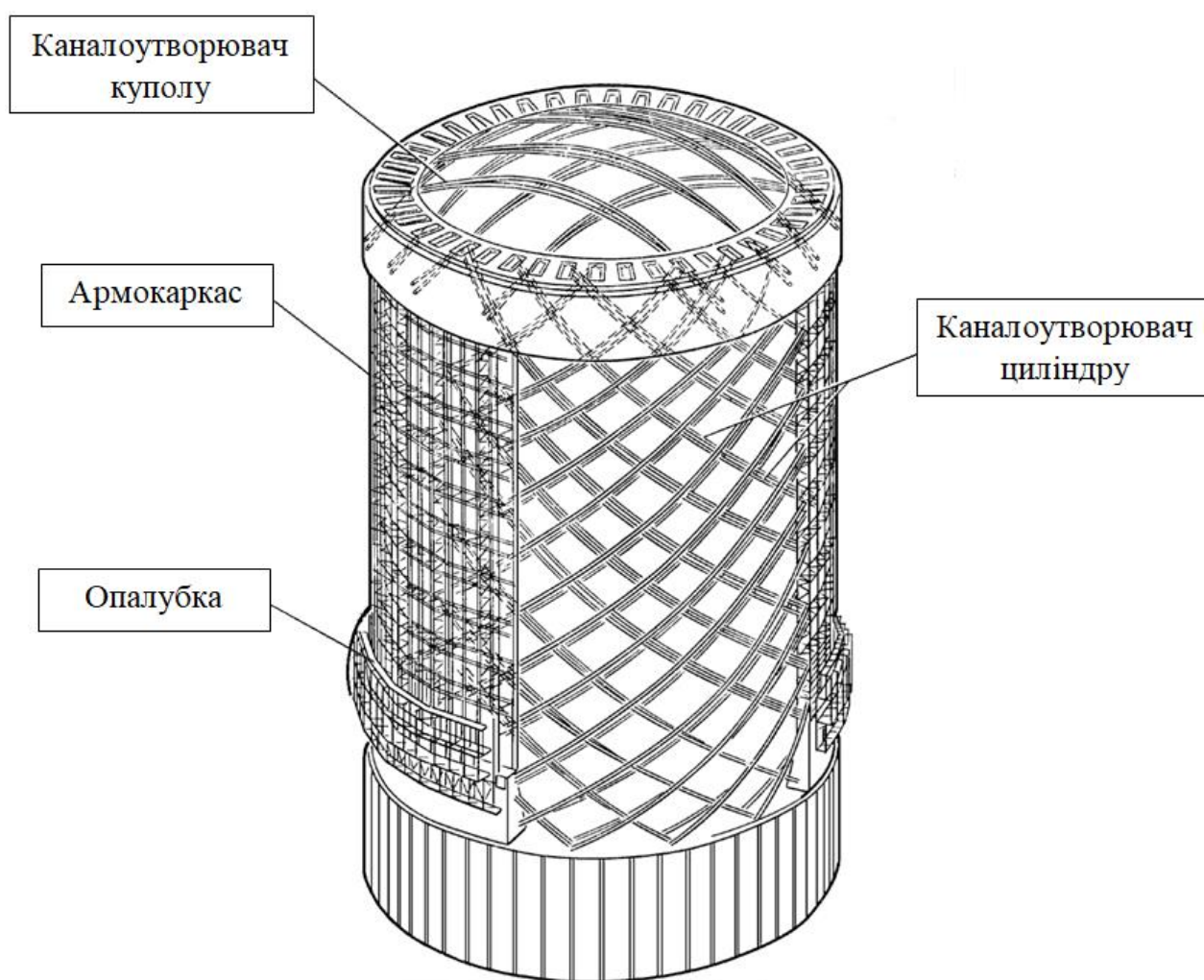


Рисунок 1.5 – Захисна герметична оболонка реакторного відділення

До складу герметичної оболонки входить система переднапруження захисної оболонки (СПЗО).

СПЗО має в своєму складі наступні елементи :

- каналоутворювачі в циліндричній і купольній частинах захисної оболонки для розміщення в них напружених АК;
- АК з елементами їх кріплення для підтримки захисної оболонки в напруженому стані;
- сталеві анкерні блоки для закріплення АК купольної частини (відм.56,00м) і циліндричної частини (відм.61,57м);
- систему для контролю зусиль в АК;
- матеріали та обладнання для заповнення каналоутворювачів антикорозійним матеріалом;
- обладнання для монтажу та натягування АК;
- захисні кришки на анкерних пристроїв;
- технологічні платформи та спеціальні площадки для обслуговування АК під час всього строку експлуатації АЕС
- спеціальне гідравлічне обладнання для вимірювань зусиль в АК та їх натягування під час всього строку експлуатації АЕС

СПЗО забезпечує:

- проєктний рівень напруженого стану бетону захисної оболонки;
- низьку ймовірність відмови елементів СПЗО в процесі експлуатації;
- можливість підтяжки та/або заміни арматурних канатів.

Анкерні пристрої розраховані на сприйняття стискаючого навантаження, яке може перевищувати зусилля розриву канату не менш ніж на 10%, та мають надійний антикорозійний та протипожежний захист.

В місці сполучення циліндра з куполом є кільце в якому за допомогою анкерного пристрою закріплюється арматура, що напружується. Циліндрична і купольна частини захисної оболонки армовані арматурними канатами довжиною від 80 м до 180 м. Кожен арматурний канат складається з 450 високоміцних дротів діаметром 5 мм і двох тяжких коушів. Діаметр арматурного каната у середньому перерізі 135...140 мм.

Довжина арматурного каната:

- у купольній частині від 95000 до 110000 мм;
- у циліндричній частині від 172000 до 180000 мм.

Маса арматурного каната з одним коушем

- купольної частини трохи більше 9000 кг;
- циліндричної частини трохи більше 14000 кг.

Проектом передбачена установка в циліндричній частині захисної оболонки 96 арматурних канатів і 36 в купольній. Арматурні канати встановлюються в каналотворювачі - в трубах з щільного поліетилену діаметром 219 мм.

У циліндричній частині захисної оболонки арматурні канати розташовуються по гвинтових лініях (гелікоїдально-петлева система) з правим і лівим напрямками заходу, кут заходу АК, по відношенню до горизонталі, становить $35^{\circ}15'$ (додаток А).

Кожен АК перегинається в нижній плиті оболонки на висоті 10,80 м, змінюючи напрямок заходу на протилежний. Обидва кінці кожного АК закріплюються на верхньому карнизі опорного кільця захисної оболонки. В стіні захисної оболонки АК розташовуються в три ряди.

У купольної частини АК розташовуються в двох взаємно перпендикулярних напрямках в два ряди по товщині. АК проходить через весь купол, перегинається на протилежному краю опорного кільця і знову повертається до зони анкерних блоків, утворюючи витягнуту петлю (додаток Б)

Напруження захисної оболонки здійснюється шляхом натягу арматурних канатів СПЗО і фіксації їх в напруженому стані за допомогою анкерних пристроїв [13]. Для натягу АК застосовуються домкрати гідравлічні типу ДГ-650/1200. Тиск робочої рідини в системі гідродомкратів створюється насосною станцією типу НС 8/500, з діапазоном створюваного тиску від 0 кгс/см^2 до 400 кгс/см^2 .

Зусилля в натягу арматурного канату:

- максимальне - 875 тс;

- мінімальне для АК циліндричної частини - 761 тс;
- мінімальне для АК купольної частини - 739 тс.

1.3. Аналіз існуючих систем дистанційного контролю зусиль АК СПЗО

1.3.1 Призначення СДКЗ АК СПЗО

В 2018 році Державною інспекцією ядерного регулювання України були затверджені «Правила улаштування та безпечної експлуатації локалізуючих систем безпеки» [14], згідно яким в проєкті енергоблока атомної станції повинні передбачатися засоби для реєстрації (оцінки) напружено-деформованого стану герметичної оболонки та засоби дистанційного контролю зусиль попередньо напружених елементів (арматурних канатів). Для реалізації цих вимог на енергоблоках атомних електростанцій України впроваджуються системи дистанційного контролю зусиль арматурних канатів системи переднапруження захисної оболонки (СДКЗ АК СПЗО) від двох постачальників – МП ООО "ТНПЦ ТОМ" м.Одеса (система СДКУ-1000) [15] та ПАО «Контрольприбор» м.Пенза (система СИУ) [16]. Дані системи мають однакові функціональні характеристики:

- безперервний дистанційний контроль, автоматичне вимірювання, індикація та реєстрація величини зусиль натягу арматурних канатів в системі переднапруження захисних оболонок енергоблоків;
- формування повідомлень обслуговуючому персоналу про необхідність натягу арматурного каната;
- збереження інформації про виміряні зусилля натягу арматурних канатів протягом встановленого терміну.

Система застосовується як засіб вимірювальної техніки для контролю зусиль натягу армоканатів в системі переднапруження захисних оболонок енергоблоків АЕС з реакторами ВВЕР-1000.

1.3.2 Технічні засоби автоматизації

Принцип дії системи полягає у сприйнятті деформації гільзи анкерного пристрою, в якій закріплено кожен кінець армоканату.

Джерелом сигналу про деформацію гільзи служить касета, утворена двома кільцями, змонтованими на гільзі, та первинним перетворювачем сили, в ролі якого виступає датчик деформації, який встановлюється між кільцями. Первинний перетворювач сприймає силу, яка відповідає зусиллю натягу армоканату, створює аналоговий електричний сигнал, пропорційний цій силі, який по лінії зв'язку, доходить до електромонтажної шафи, в якій оцифровується і передається у вигляді цифрового сигналу в СПОД для програмної обробки цього сигналу, видачі інформації про результати вимірювання на екран монітору, зберігання та передачі даних в мережу по протоколу Ethernet.

Структурну схему комплексу технічних засобів системи дистанційного контролю зусиль в арматурних канатах захисної оболонки приведено в додатку А.

Складові частини системи: первинний перетворювач сили, вбудований в силовимірювальну касету, з'єднаний кабелями з АЦП, ПЕОМ, який контролює зусилля одного армоканата, являють собою вимірювальний канал системи.

Силовимірювальна касета складається з деталей вбудови датчиків ДСТВ-1М які встановлені на гільзу анкерного пристрою армоканату. Загальний вигляд касети показано на рисунку 1.6.

Касета містить в своєму складі нижню та верхню обойми, які виготовлені в вигляді півкілець з'єднаних між собою стяжними болтами. Датчик встановлюється на пласку торцеву поверхню нижньої обойми. Силосприймальний центр датчика через елемент силовведення контактує з верхньою обоймою. Елемент силовведення регульовальний гвинт, який може переміщуватися в напрямку його осі з метою створення попереднього натягу датчика. Датчик встановлюється на пласку торцеву поверхню нижньої

обойми. Силосприймальний центр датчика через елемент силовведення контактує з верхньою обоймою. Елемент силовведення регулювальний гвинт, який може переміщуватися в напрямку його осі з метою створення попереднього натягу датчика. Електричний сигнал який створюється датчиком потрапляє в АЦП.

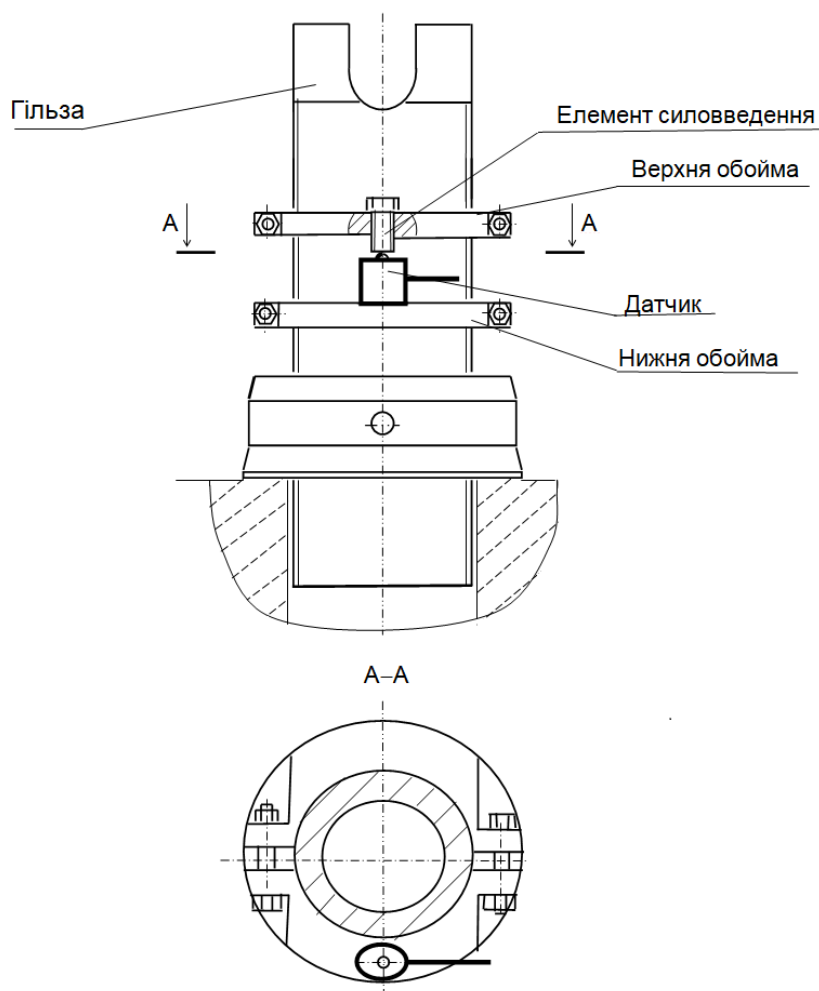


Рисунок 1.6 – Силівимірювальна касета.

Датчик силівимірювальний тензорезисторний ДСТВ1М-0,5 (рисунок 1.7) призначений для використання в пристроях вимірювання статичних або повільно змінюваних сил в діапазоні від 0 до 0,5кН для роботи в діапазоні температур від мінус 40 до плюс 60⁰С, категорія точності 0,1%, вхідний та вихідний опір 350 Ом, найбільше значення напруги живлення постійного струму 12В.



Рисунок 1.7 – Датчик силовимірювальний тензорезисторний ДСТВ1М-0,5

В системі СИУ для вимірювання зусиль використовується датчик деформації ДД (рисунок 1.8) призначений для вимірювання деформації в діапазоні від 0 до 120мкм, дискретність відліку 0,01мкм принцип дії якого заснований на вимірюванні частоти коливання струни, яка вбудована в датчик за допомогою котушки індуктивності яка одночасно є збуджувачем коливань та вимірювачем затухаючих коливань.



Рисунок – 1.8 Датчик деформації ДД

Аналого цифровий перетворювач (СИМ-А08.11.1) (рисунок 1.9), який використовується в системі СДКУ-100 призначений для:

- створення стабілізованої напруги +3,3В для живлення восьми датчиків;
- контролю споживання (функція «коротке замикання») та видачі цієї інформації в лінію;
- прийому та перетворенню аналогового сигналу датчиків в цифровий код та передачі його на вхід станції прийому та обробки даних або на пульт контролю в зоні силовимірювання.



Рисунок – 1.9 Аналого цифровий перетворювач (СИМ-А08.11.1)

В ролі аналого цифрового перетворювача в системі СИУ використовується перетворювач сигналу датчика-струна ПСД-С-У (рисунок 1.10), який забезпечує вимірювання частоти (періоду) вхідного синусоїдального сигналу в діапазоні від 1500 Гц до 4500 Гц (222,22 мкс до 666,66 мкс), вимірювання вхідного опору від 80 Ом до 120 Ом, видачу сигналу запиту амплітудою від 86,4 В до 105,6 В тривалістю на рівні 0,1 амплітудного значення в діапазоні від 0,3 мс до 0,7 мс.



Рисунок 1.10 Перетворювач сигналу датчика-струна ПСД-С-У

Під час експлуатації існуючих систем дистанційного контролю зусиль АК СПЗО було виявлено недостовірність вимірювань зусиль напруження арматурних канатів захисної оболонки яка спричинена зміною температури навколишнього середовища, що пливає на вимірювальну ділянку ІВК. Даний недолік можна виправити шляхом модернізації програмного забезпечення та введенням в розрахунки алгоритму термокомпенсації.

Аналізуючи структурну схему, проекти та кошториси було виявлено що довжина кабелів що з'єднують датчики з АЦП від 20 до 45 метрів, а загальна довжина кабельних ліній вимірювального каналу дорівнює майже 10 км. Суттєве зменшення кабельної продукції можливе в разі застосування в системі дистанційного контролю цифрових датчиків, що додатково призведе до виключення зі структурної схеми аналого-цифрових перетворювачів, сейсмостійких металоконструкцій на яких закріплені АЦП, підвищення точності вимірювань а також надасть можливість калібрувати датчики для лінеаризації вихідних даних.

У першому розділі було розглянуто загальну інформацію про атомні електростанції, їх технологічні параметри, розглянуто типи захисних оболонок та існуючі системи дистанційного контролю зусиль які експлуатуються на багатьох енергоблоках АЕС України. За результатами аналізу існуючих систем були розроблені рекомендації щодо їх модернізації.

2 МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ СТАНУ ЗАХИСНИХ ОБОЛОНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК

2.1. Аналіз існуючих математичних моделей захисних оболонок

Більшість публікації з дослідження міцності й стійкості оболонкових конструкцій засновано на припущенні що матеріал конструкції лінійно-пружний та ізотропний. Однак необхідно враховувати й такі властивості матеріалу як нелінійна пружність, повзучість, ортотропія. Більшість робіт по дослідженню стійкості оболонок засновано на моделі Кірхгофа-Лява, в яких не враховуються поперечні здвиги. При дослідженні міцності та стійкості оболонкових конструкцій з суттєвим є вибір математичної моделі деформування конструкцій, яка повинна найбільш точно враховувати основні фактори які впливають на напружено-деформований стан конструкції. Також важливим є вибір алгоритму який дозволяє отримати найбільш точні дані щодо міцності й стійкості оболонки та який є оптимальним для свого кола задач [17].

Розглянемо математичні моделі, які засновані на теорії оболонок типу Тимошенко, які враховують геометричну нелінійність та поперечні здвиги. Також будемо враховувати можливість введення ребер жорсткості двома способами: дискретно або по методу конструктивної анізотропії. Оболонки будемо розглядати під дією зовнішнього статичного рівномірно розподіленого поперечного механічного навантаження $q(x, y)$. Будемо враховувати різні властивості матеріалу: лінійну та нелінійну пружність, можливість розвитку деформацій повзучості.

Математична модель деформування оболонок складається з трьох груп співвідношень:

- геометричних, які пов'язують деформації та переміщення;
- фізичних, які пов'язують напруження та деформації;

- функціонала повної потенціальної енергії деформації оболонки, з умови мінімуму, якого складаються рівняння рівноваги.

Геометричні співвідношення в серединній поверхні оболонки з врахуванням геометричної нелінійності мають вигляд:

$$\varepsilon_x = \frac{1}{A} \frac{\partial A}{\partial x} + \frac{1}{AB} V \frac{\partial A}{\partial y} - k_x W + \frac{1}{2} \theta_1^2,$$

$$\varepsilon_y = \frac{1}{B} \frac{\partial V}{\partial y} + \frac{1}{AB} U \frac{\partial B}{\partial x} - k_y W + \frac{1}{2} \theta_2^2,$$

$$\gamma_{xy} = \frac{1}{A} \frac{\partial V}{\partial x} + \frac{1}{B} V \frac{\partial U}{\partial y} - \frac{1}{AB} U \frac{\partial A}{\partial y} - \frac{1}{AB} V \frac{\partial B}{\partial x} + \theta_1 \theta_2,$$

$$\theta_1 = - \left(\frac{1}{A} \frac{\partial W}{\partial x} + k_x U \right),$$

$$\theta_2 = - \left(\frac{1}{B} \frac{\partial W}{\partial y} + k_y V \right).$$

де $\varepsilon_x, \varepsilon_y$ – деформації подовження уздовж координат x, y серединної поверхні γ_{xy} – деформації здвигу в площині xOy ; $k_x = 1/R_1, k_y = 1/R_2$ – головні кривизни оболонки уздовж осей x і y ; R_1, R_2 – головні радіуси кривизни уздовж осей x і y ; A, B – параметри Ламе, які характеризують геометрію оболонки; $U = U(x, y), V = V(x, y), W = W(x, y)$ – переміщення точок серединної поверхні оболонки уздовж осей x, y, z .

Для визначення нелінійних залежностей між компонентами напружень та деформацій будемо використовувати теорію нелінійної пружності й пластичності анізотропних середовищ. Згідно цієї теорії співвідношення між деформаціями та напруженнями записуються в вигляді:

$$\varepsilon_x^z = \left(1/E_1 + \Psi q_{1111} \right) \sigma_x + \left(-\mu_{12}/E_2 + \Psi q_{1122} \right) \sigma_y ,$$

$$\varepsilon_y^z = \left(1/E_2 + \Psi q_{2222} \right) \sigma_y + \left(-\mu_{21}/E_1 + \Psi q_{2211} \right) \sigma_x ,$$

$$\gamma_{xy} = \left(1/G_{12} + 4\Psi q_{1212} \right) \tau_{xy} ,$$

$$\gamma_{xz} = \left(1/G_{13} + 4\Psi q_{1313} \right) \tau_{xz} ,$$

$$\gamma_{yz} = \left(1/G_{23} + 4\Psi q_{2323} \right) \tau_{yz} ,$$

де σ_x , σ_y , τ_{xy} , τ_{xz} , τ_{yz} – компоненти напружень; $\Psi(f)$ – функція, яка описує нелінійне деформування ортотропного матеріалу; E_i , μ_i , G_i – механічні характеристики матеріалу (модулі пружності, коефіцієнти Пуассона та модулі здвигу), q_i – постійні, які враховують анізотропію нелінійних властивостей матеріалу.

При дослідженні тонкостінних оболонкових конструкцій необхідно аналізувати їх стійкість та міцність. Якщо для ізотропної оболонки достатньо оцінювати інтенсивність напружень, то для ортотропної та анізотропної необхідно використовувати спеціальні критерії міцності. В цих критеріях використовуються константи граничних значень напружень в матеріалі при чому значення границь міцності в різних напрямках, а також на розтяг, стиск та здвиг можуть бути різними. Існує безліч алгоритмів розрахунку оболонкових конструкцій які дозволяють розрахувати критичні навантаження, точки біфуркації, досліджувати закритичну поведінку оболонок та ін. До них відносяться алгоритми, які засновані на методі Рітца; алгоритми засновані на апроксимації шуканих функцій NURBS-поверхнями та методі L-BFGS.

Розроблені математичні моделі дозволяють достовірно досліджувати міцність і стійкість різних оболонкових конструкцій.

Врахування ортотропії матеріалу дозволяє досліджувати оболонки із сучасних композиційних матеріалів. Облік геометричної нелінійності дозволяє досліджувати стійкість у нелінійній постановці та, крім того, дослідити закритичну поведінку конструкції. Облік фізичної нелінійності та повзучості матеріалу оболонки дозволяє досліджувати зниження критичного навантаження порівняно з пружною постановкою за рахунок нелінійно-пружної роботи матеріалу та за рахунок втрати стійкості від повзучості матеріалу при тривалому навантаженні.

Згідно з нормами розрахунку на міцність обладнання та захисних оболонок атомних енергетичних установок [18] розрахунок ведеться по уніфікованим формулам. При цьому конструкція розглядається як сукупність оболонок класичної форми (циліндрична, сферична, еліптична), розрахунок кожної з яких проводиться окремо, незалежно від інших, а більш складні випадки оболонок, що перетинаються не розглядаються. Такі методи розрахунку не дозволяють виявити та проаналізувати концентрації напружень, що виникають в місцях закріплення, різкої зміни товщини, форми, та суцільності (отвори, тріщини і т.д.) (рисунок 2.1).

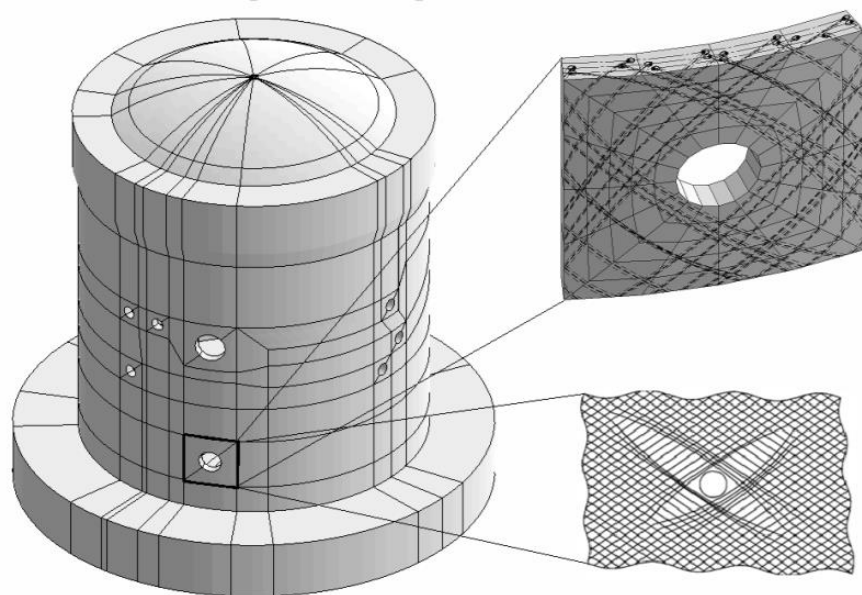


Рисунок 2.1 – Захисна оболонка АЕС з попередньо напруженими армованими канатами

Також, в розрахунках не враховується попереднє напруження ЗО від армоканатів в циліндричній частині ЗО в місцях розміщення шлюзів та гермопроходок, схеми розташування яких, більш детально приведено на рисунку 2.2.

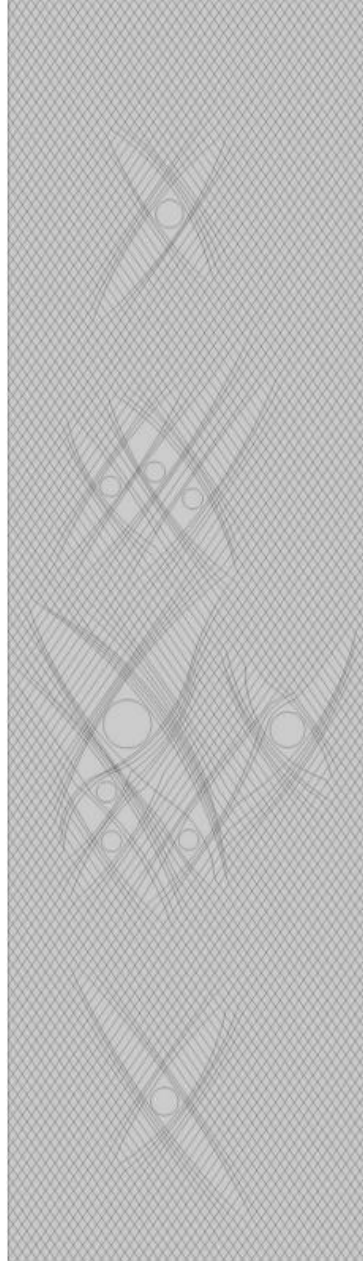


Рисунок 2.2 – Ділянка циліндричної частини захисної оболонки з отворами та шлюзами.

Експериментальний підхід (моделювання на маломасштабних моделях, натурні випробування на стендах) також мають декілька суттєвих недоліків. По-перше контейнери АЕС та випробувальні стенди

для них є унікальними і дорогими виробами, і не завжди існує можливість виготовити декілька зразків і випробувальних стендів, по-друге із-за технічної складності відтворення того чи іншого режиму на стенді може бути неможливим. Хоча дослідженням, спрямованим на вирішення цих задач, починаючи з 1960-х років приділяється велика увага у нашій країні і за кордоном методи розрахунків у більшості випадків мають невисоку точність.

2.2 Програмна реалізація методу скінченних елементів

Складність механічних і теплофізичних процесів, а також з невизначеність умов розвитку аварійних ситуацій не дозволяють будувати математичні моделі без багатьох спрощуючих допущень. Побудова більш точних математичних моделей можлива лише з переходом на сучасні чисельні методи розрахунків, найбільше розповсюдження з яких отримав метод скінченних елементів (МСЕ). У загальному випадку, для математичного моделювання сейсмічного впливу на залізобетонні конструкції АЕС класичним є динамічна задача механіки деформованого твердого тіла. Розроблена математична модель, що пропонується у даній роботі, на відміну від відомих, дозволяє досліджувати напружено-деформований стан (НДС) оболонки, враховуючи основні чинники, що впливають на її роботу в аварійних режимах (сейсмічна хвиля та як наслідок аварії після землетрусу – розрив армоканатів). Однією з головних вимог, що висувається до побудови математичної моделі є можливість отримання шуканого рішення за якомога коротший термін. Тому важливе місце при її створенні відводиться питанню вибору ефективного скінченого елемента. Захисна оболонка являє собою складну просторову конструкції, що має криволінійні обриси. Якщо описання поверхні такої конструкції робити за допомогою класичних скінченних елементів, то для достатньо точної

апроксимації її геометрії та НДС потрібна дуже велика кількість елементів. Найбільш доцільно для опису подібної геометрії використовувати елементи криволінійного обрису, коефіцієнти матриці жорсткості котрого визначаються на основі співвідношень моментної схеми. Це дозволяє при чисельній дискретизації тіла обійтися меншою кількістю елементів, тобто зменшити кількість невідомих при розв'язанні системи рівнянь, а в результаті – час вирішення задачі.

Розроблені алгоритми дослідження математичних моделей ефективні для програмування і дозволяють знаходити рішення поставленої задачі з високою точністю. Кожен із розроблених алгоритмів оптимальний для свого кола завдань.

За розробленими математичними моделями та алгоритмами їх дослідження складено програмні продукти, на які отримано свідоцтва про державну реєстрацію та проведено комплексні дослідження міцності та стійкості різних оболонкових конструкцій.

З урахуванням особливостей навантаження розроблена система інформаційної підтримки життєвого циклу захисних оболонок та обладнання АЕС CALS-APROKS яка дозволяє виконувати розрахунки на міцність для коректного визначення еволюції компонент напружено-деформованого стану захисних оболонок [19]. На базі методики Ньюмарка, методу змінних жорсткостей та методу додаткових навантажень реалізований покроковий алгоритм розрахунку конструкцій для моделювання еволюції напруженодеформованого стану захисної оболонки АЕС за нормальних умов експлуатації та в умовах наближених до аварії (нагнітання внутрішнього тиску, розрив армоканатів, вплив від сейсмічного навантаження).

Складність геометрії використовуваних розрахункових сіток обумовлена наявністю підобластей, що відрізняються фізико-механічними характеристиками матеріалів і розмірами скінчених елементів (сітки згущаються в зонах концентрації напружень і

розріджуються на периферії досліджуваної області основи). Вказана обставина потребує використання квазірегулярних дискретних моделей, тобто регулярних у межах підобласті. У цілому ж по області розрахункова сітка може бути нерегулярною.

Координати, переміщення вузлів і зовнішні впливи розглядаються відносно глобальної декартової системи координат, а апроксимація координат, переміщень, деформацій і напружень у межах скінченного елемента виконується у локальній системі координат скінченного елемента.

Апробація розробленої математичної моделі виконується в рамках системи інформаційної підтримки життєвого циклу захисних оболонок та обладнання АЕС CALS-APROKS, яка була допрацьована з метою підвищення ефективності процесу задавання вихідних даних для розрахунків складних просторових конструкцій та забезпечення можливості візуалізації скінчено-елементної моделі і результатів розрахунку обладнання та ЗО АЕС.

Досліджувана конструкція за нормальних умов експлуатації має постійні граничні умови навантаження, а саме:

- власна вага ЗО з масивами ґрунту;
- напруження попереднього обтиснення від армоканатів в ЗО;

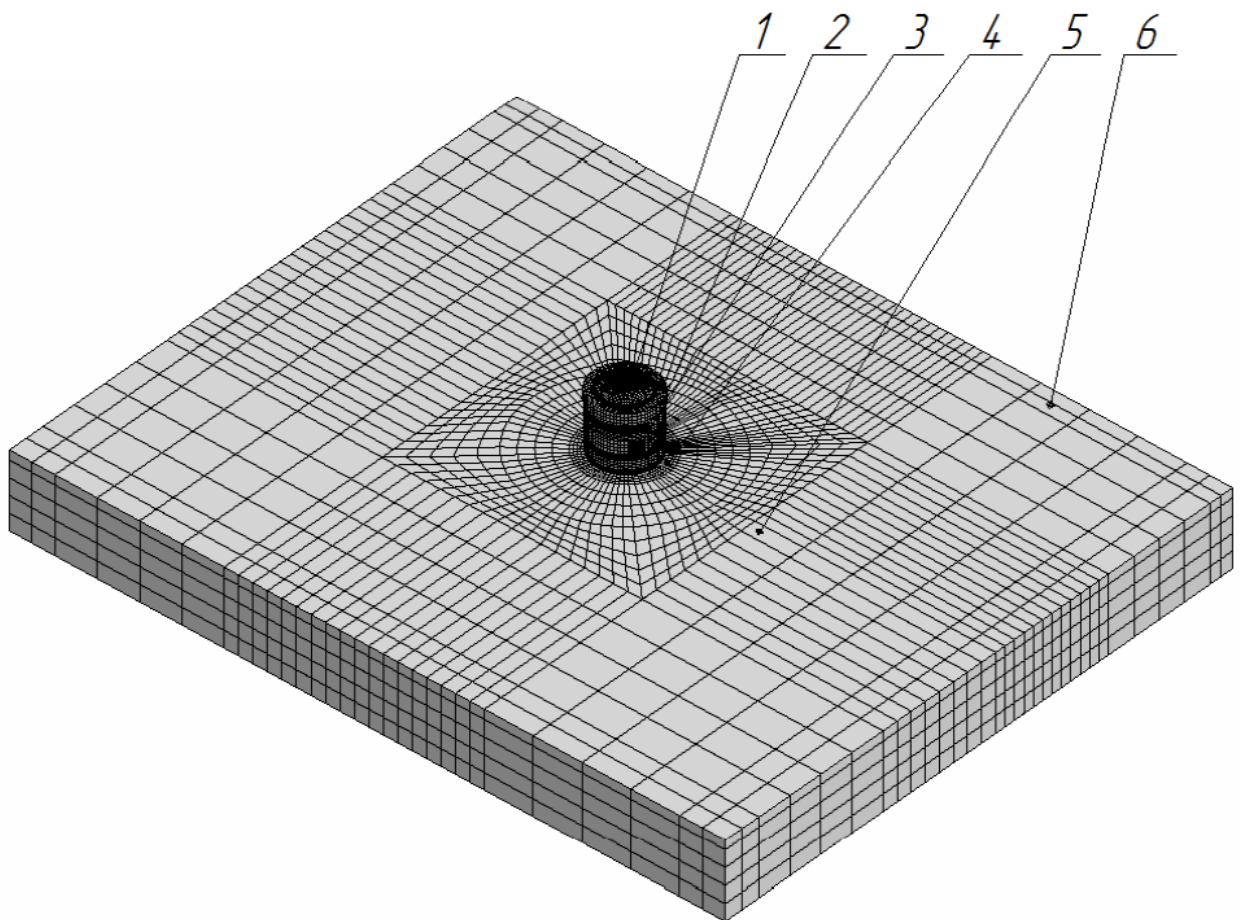
Математична модель дозволяє моделювати позаштатні ситуації, що можуть призвести до аварії в обладнанні та ЗО АЕС:

- нагнітання внутрішнього тиску в ЗО, як наслідок розриву трубопроводу в контурі АЕС;
- розрив армоканатів в ЗО АЕС, як наслідок значних деформацій від дії внутрішнього тиску;
- сейсмічна дія на ЗО АЕС, що знаходилась при нормальних умовах експлуатації.

Для мінімізації ефекту відбивання та віддзеркалювання сейсмічних хвиль від границь ґрунту в розрахункову схему включено фрагменти

демпфера, які дозволяють більш коректно змоделювати граничні умови землетрусу. Повна скінченно-елементна модель конструкції у середовищі CALSAPROKS (рисунок 2.3) побудована з 426 фрагментів, а саме:

- купол (80 фрагментів);
- стінки (106 фрагментів);
- гермопроходки, шлюзи і технічні канали (20 фрагментів);
- фундамент (48 фрагментів);
- ґрунт (134 фрагментів);
- демпфер (38 фрагментів).



1 – купол; 2 – стінки; 3 – гермопроходки, шлюзи і технічні канали; 4 – фундамент; 5 – фундамент; 6 – демпфер

Рисунок 2.3 – Скінченно - елементна модель захисної оболонки АЕС з урахуванням масиву ґрунту

Для мінімізації ефекту відбивання та віддзеркалювання сейсмічних хвиль від границь ґрунту в розрахункову схему включено фрагменти

демпфера, які дозволяють більш коректно змоделювати граничні умови землетрусу.

Чисельний аналіз міцності дозволяє визначити найбільш вразливі зони концентрації напружень в ЗО АЕС при нормальних умовах її експлуатації, при виникненні розриву АК. Як видно з рисунків 2.4 – 2.7, контеймент знаходиться в складному напружено-деформованому стані через попереднє обтиснення від армоканатів.

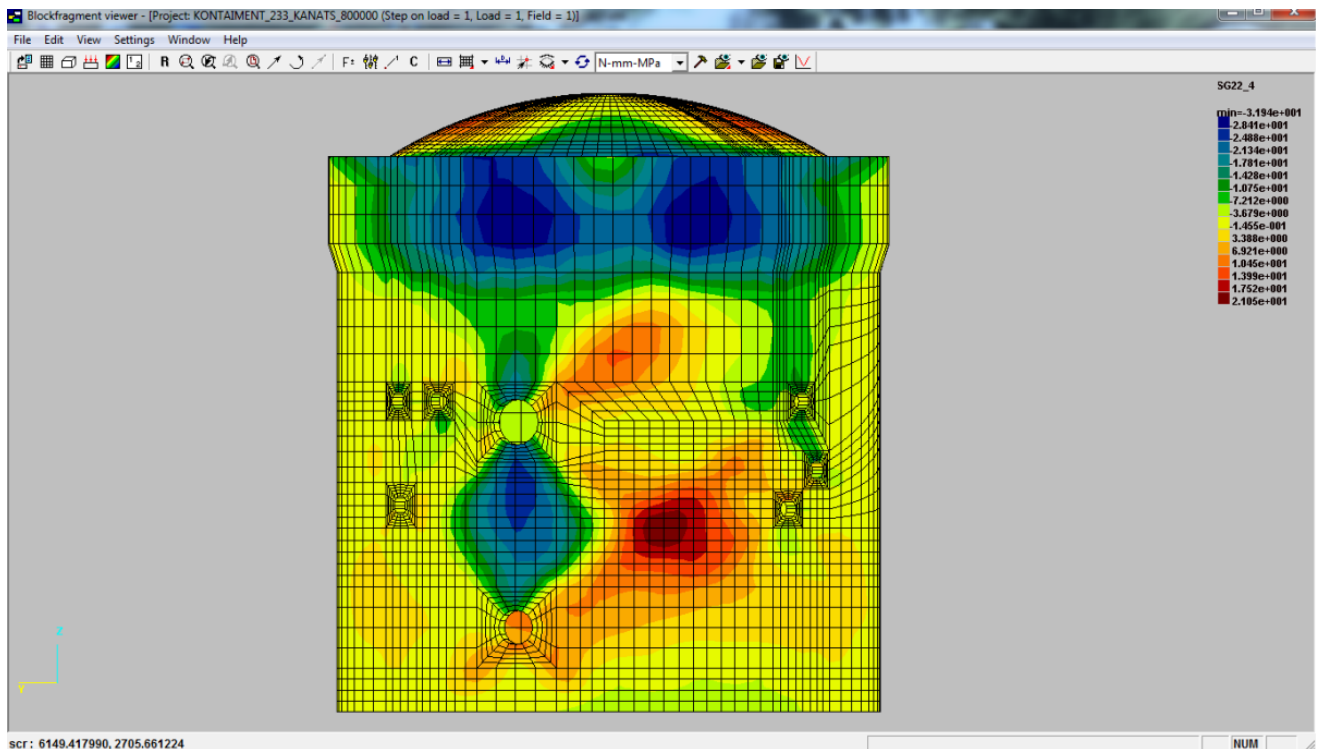


Рисунок 2.4 – Максимальні головні розтягуючі напруження в захисній оболонці АЕС за нормальних умов експлуатації

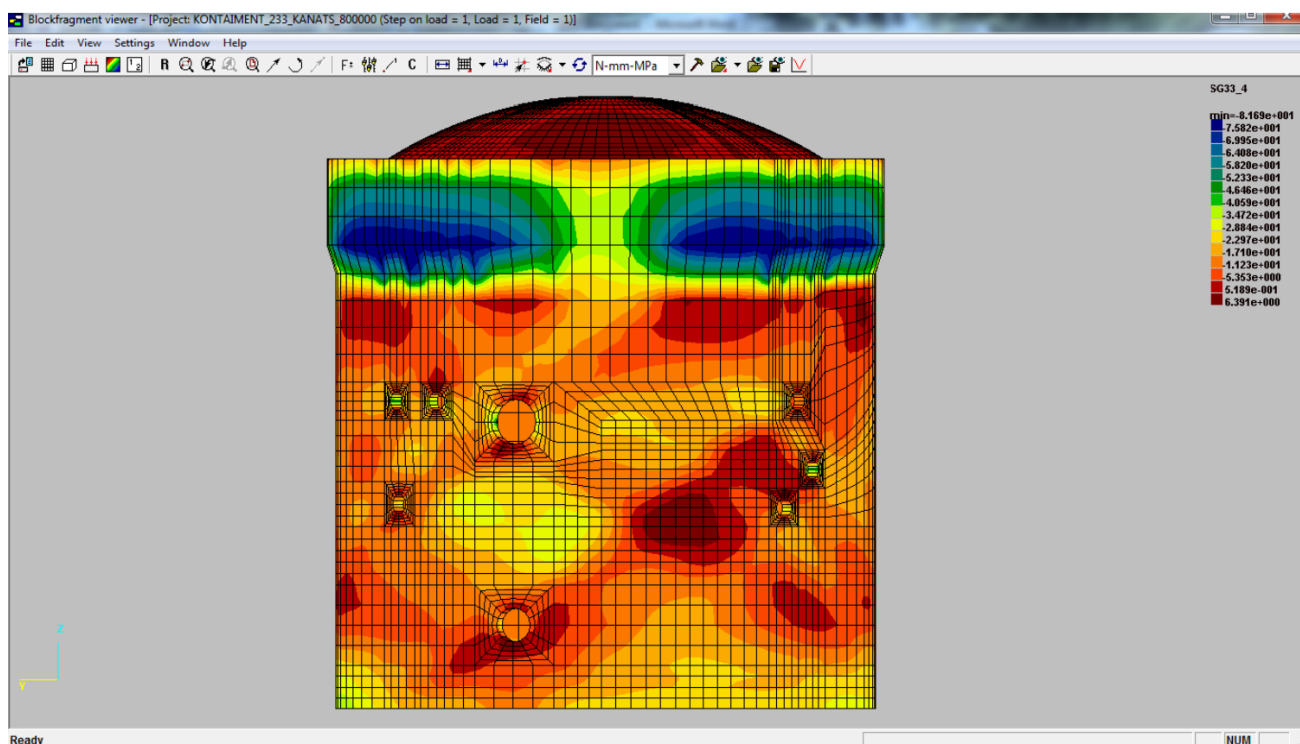


Рисунок 2.5 – Максимальні головні стискаючі напруження в захисній оболонці АЕС за нормальних умов експлуатації

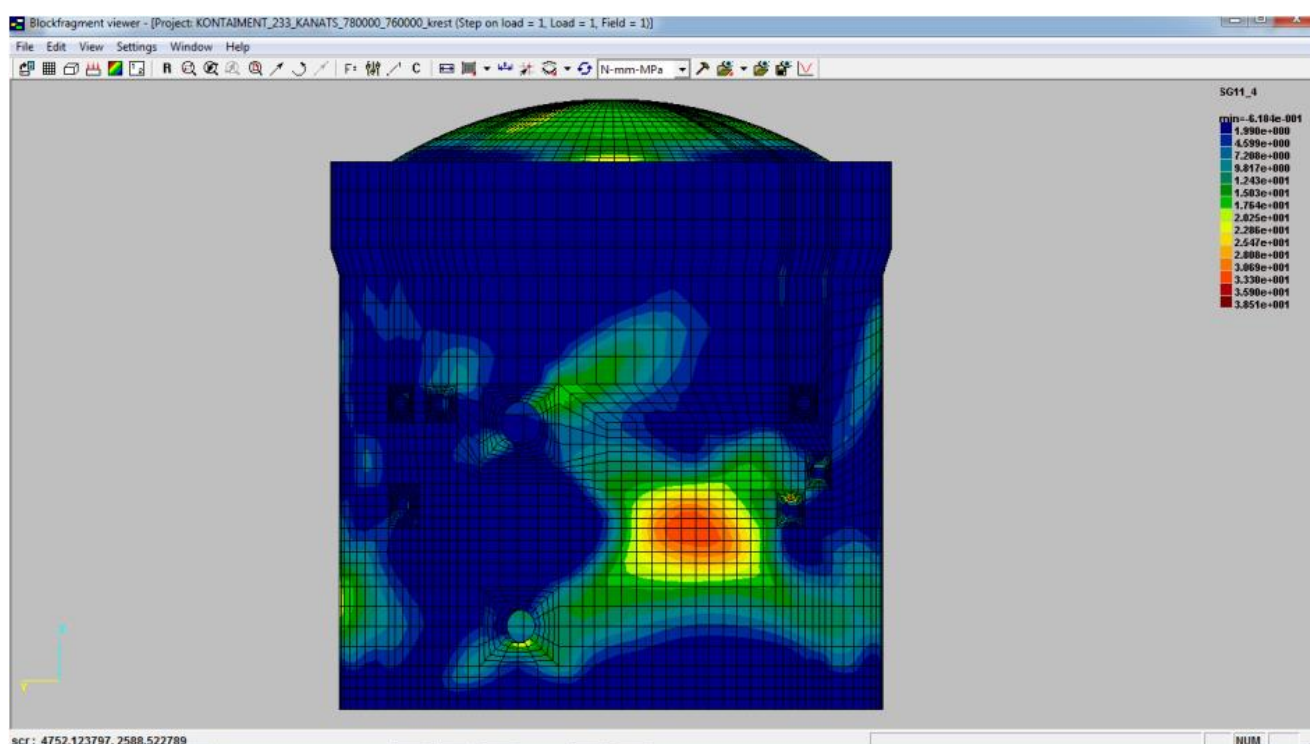


Рисунок 2.6 – Результати розрахунку захисної оболонки АЕС за умови розриву двох канатів розташованих «хрест на хрест»

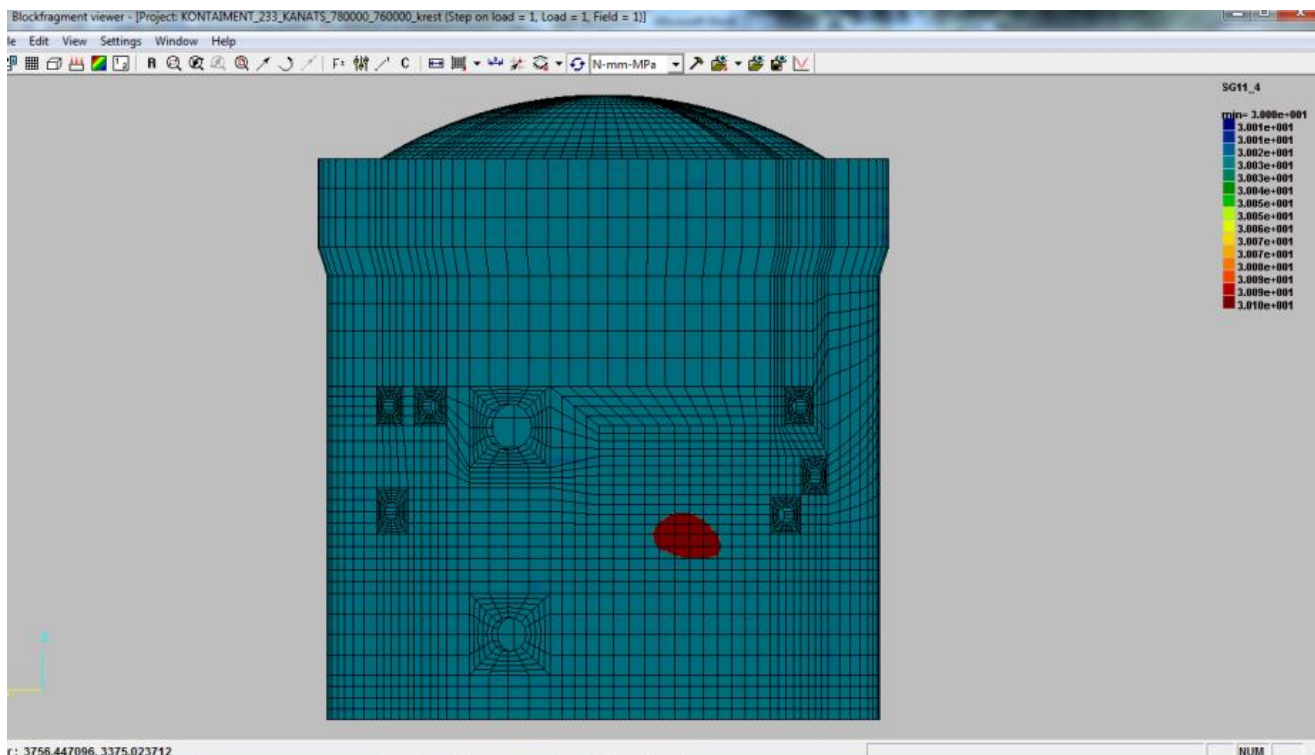


Рисунок 2.7 – Зона руйнування в ЗО за умови розриву двох канатів розташованих «хрест на хрест»

Для дослідження напружено-деформованого стану в ЗО АЕС за умов сейсмічного навантаження в CALS-APROKS реалізований окремий модуль. Він дозволяє виявити максимальні напруження в конструкції шляхом покрокового розрахунку, з заданням динамічного навантаження, значення якого взяті з акселерограми землетрусу в 8 балів, що приведена на рисунку 2.8

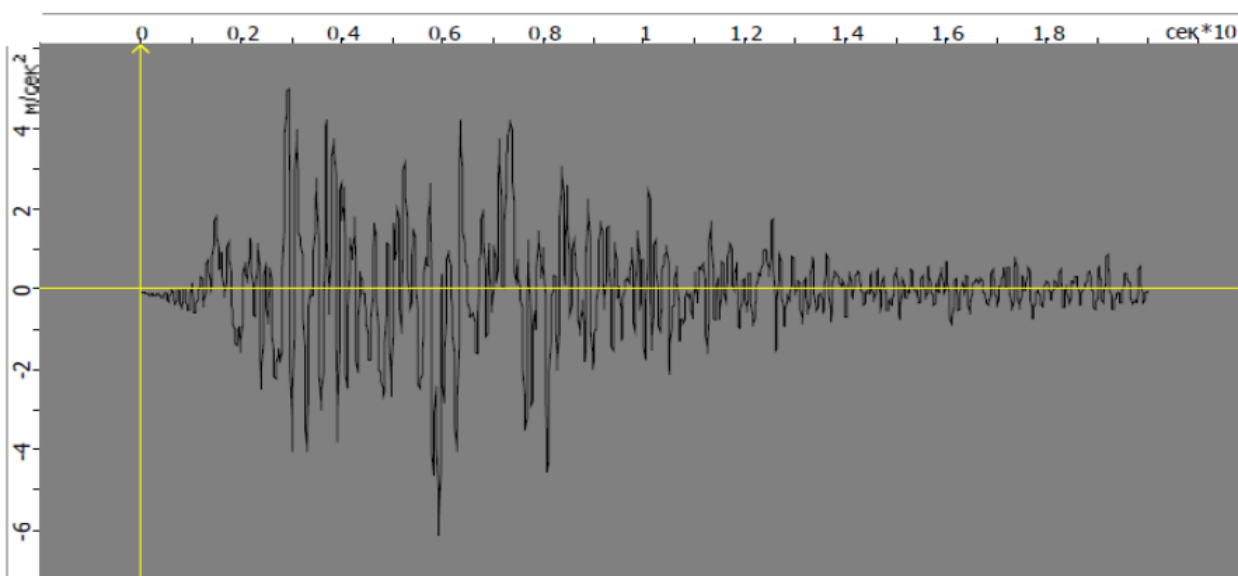


Рисунок 2.8 – Акселерограма землетрусу

Апробація виконується для еволюції напружено-деформованого стану ЗО АЕС та дослідження максимальних головних розтягуючих напружень по товщині конструкції. Весь період обрахунку можна розділити на декілька етапів:

- момент поштовху;
- вертикальний рух хвилі по ґрунту;
- передача поштовху хвилі в ЗО;
- концентрація напружень в по циліндричній частині ЗО;
- відбивання хвилі від купола ЗО;
- розподіл навантаження по ЗО з урахуванням додаткових, відбитих хвиль від купола.

Аналіз НДС оболонки при її динамічній деформації свідчить про те, що хвиля землетрусу направляє вертикально, після чого вона відбивається від купола і виникає ефект суперпозиції хвиль, що значно ускладнює характер навантаження. Максимальні напруження, що виникають в захисній оболонці під час землетрусу приведені на рисунку 2.9. Максимальні розтягуючі зусилля виявлені в гермопроходці приведені на рисунку 2.10.

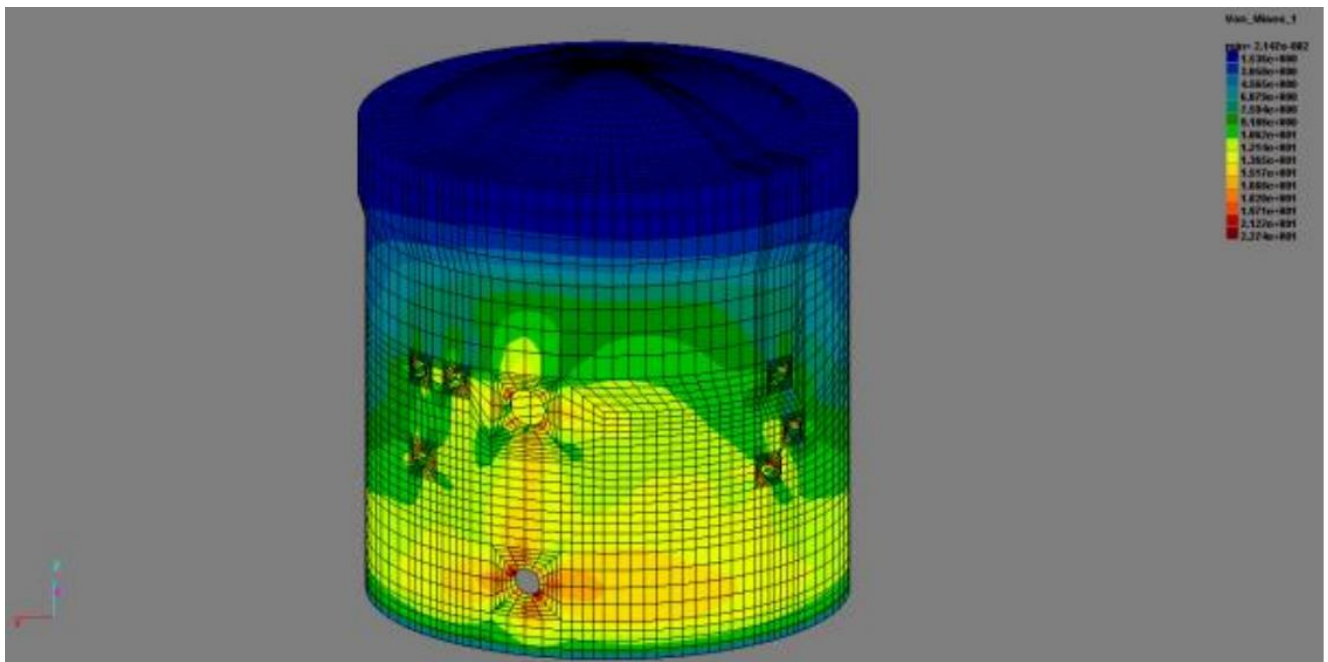


Рисунок 2.9 – Напруження в захисній оболонці АЕС під час землетрусу

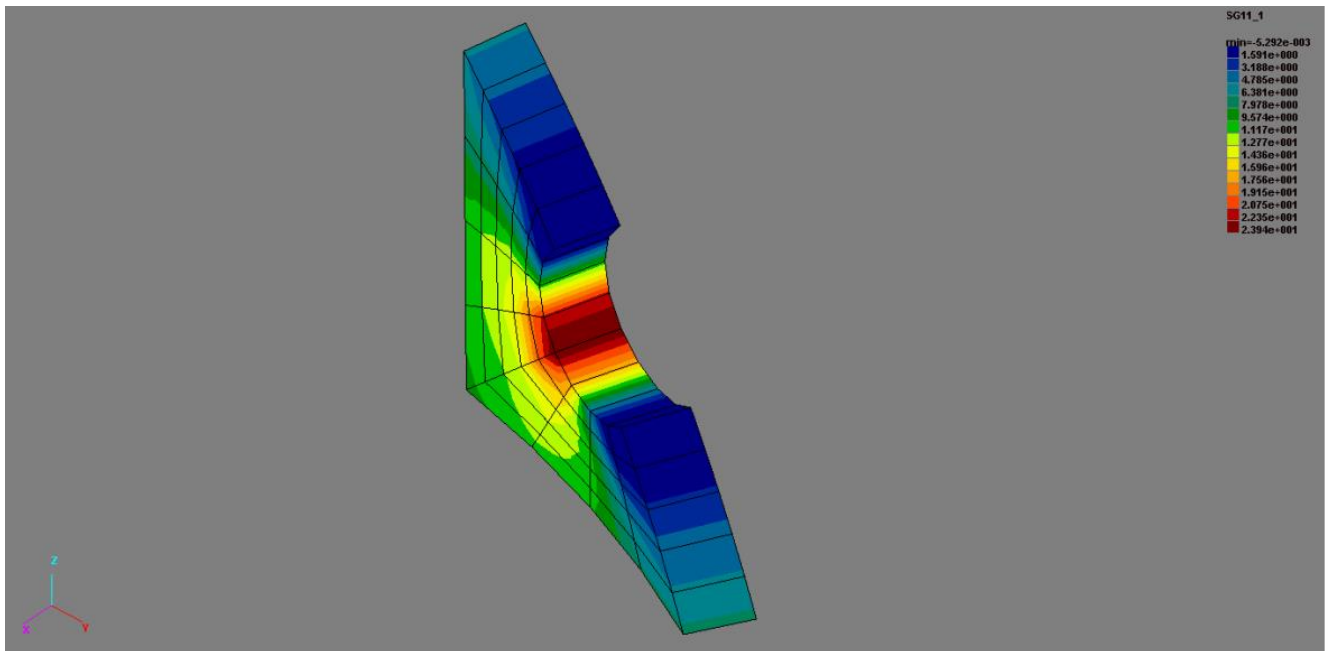


Рисунок 2.10 – Максимальні розтягуючі напруження в гермопроходці

Після проведеного аналізу були виявлені максимальні значення напружень в місці технологічного каналу що становить 2,3 МПа на 14 секунді розрахункового землетрусу. Максимальні розтягуючі напруження виникли в гермопроходці що становить 2,4 МПа на тому ж інтервалі. Згідно з нормами розрахунку на міцність, номінальні допустимі напруження на розтяг для подібного роду конструкцій, приймають 3 МПа, тому можна зробити висновок що захисна оболонка має достатній запас міцності та здатна витримувати механічні напруження що виникають під час землетрусу в 8 балів. Програмне забезпечення дозволяє отримати значення, за якими визначено небезпечні зони в ЗО АЕС. В місцях перетину армоканатів в четвертому шарі ЗО визначені максимальні головні напруження на розтяг. Допустимі напруження не перевищені, та дослідженням вузлам слід приділити підвищену увагу. При більших навантаженнях чи їх комбінації (внутрішній тиск, послаблення сили попереднього обтиснення від армоканатів, сейсмічне навантаження) виявлені ділянки можуть отримати критичні значення розтягуючих напружень, та як наслідок, можливе утворення локальних зон руйнування.

2.3 Розрахунок коефіцієнтів температурної компенсації у середовищах Matlab та Excel.

Під час проходження практики на «ВП Запорізька АЕС» в цеху теплової автоматики та вимірювань проводилося ознайомлення з призначенням, складом та функціями системи дистанційного контролю зусиль арматурних канатів системи переднапруження захисної оболонки та розглянуто архів ретроспективних даних які зберігаються на сервері станції прийому та обробки даних впродовж року. Під час аналізу було виявлено, що в денний час при підвищенні температури навколишнього середовища значення виміряних зусиль різко збільшуються, що свідчить про негативний вплив температури на вимірювальну ділянку системи.

В процесі визначення орієнтації атомної станції на мапі (рисунок 2.11),

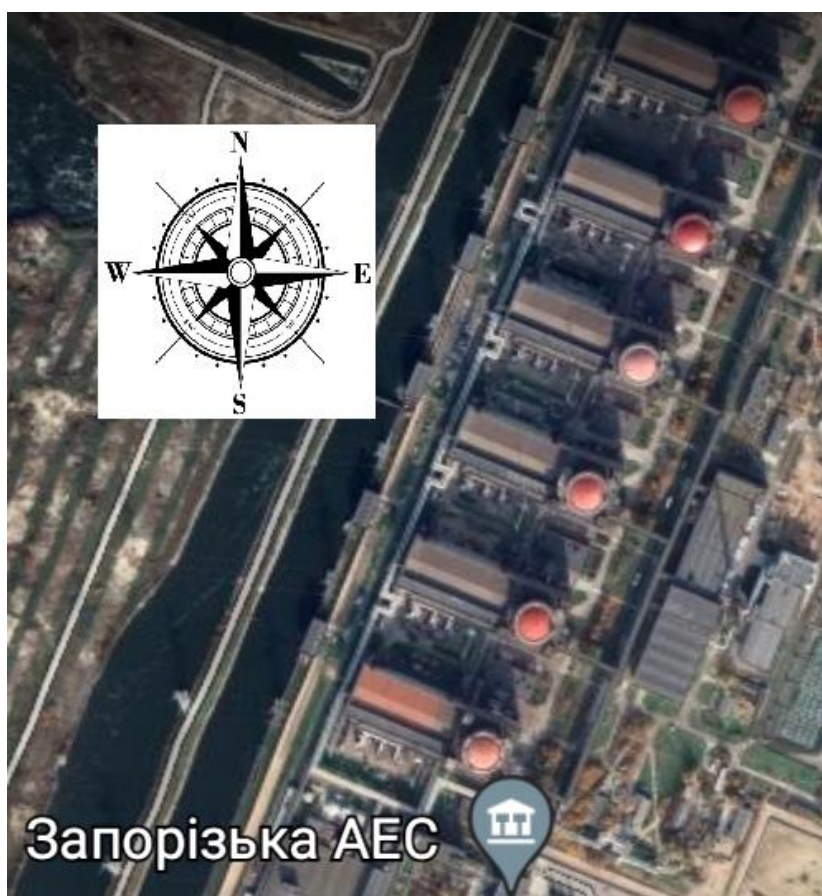


Рисунок 2.11. Розміщення Запорізької АЕС на мапі.

та ознайомленням з кресленнями проекту енергоблоку (рисунок 2.12), було

визначено які саме гільзи анкерних пристроїв знаходяться на південній, а які на північній частині куполу захисної оболонки – (17АК, 17БК, 18АК, 18БК – південна частина куполу, 33АК, 33БК, 34АК, 34БК – північна частина).

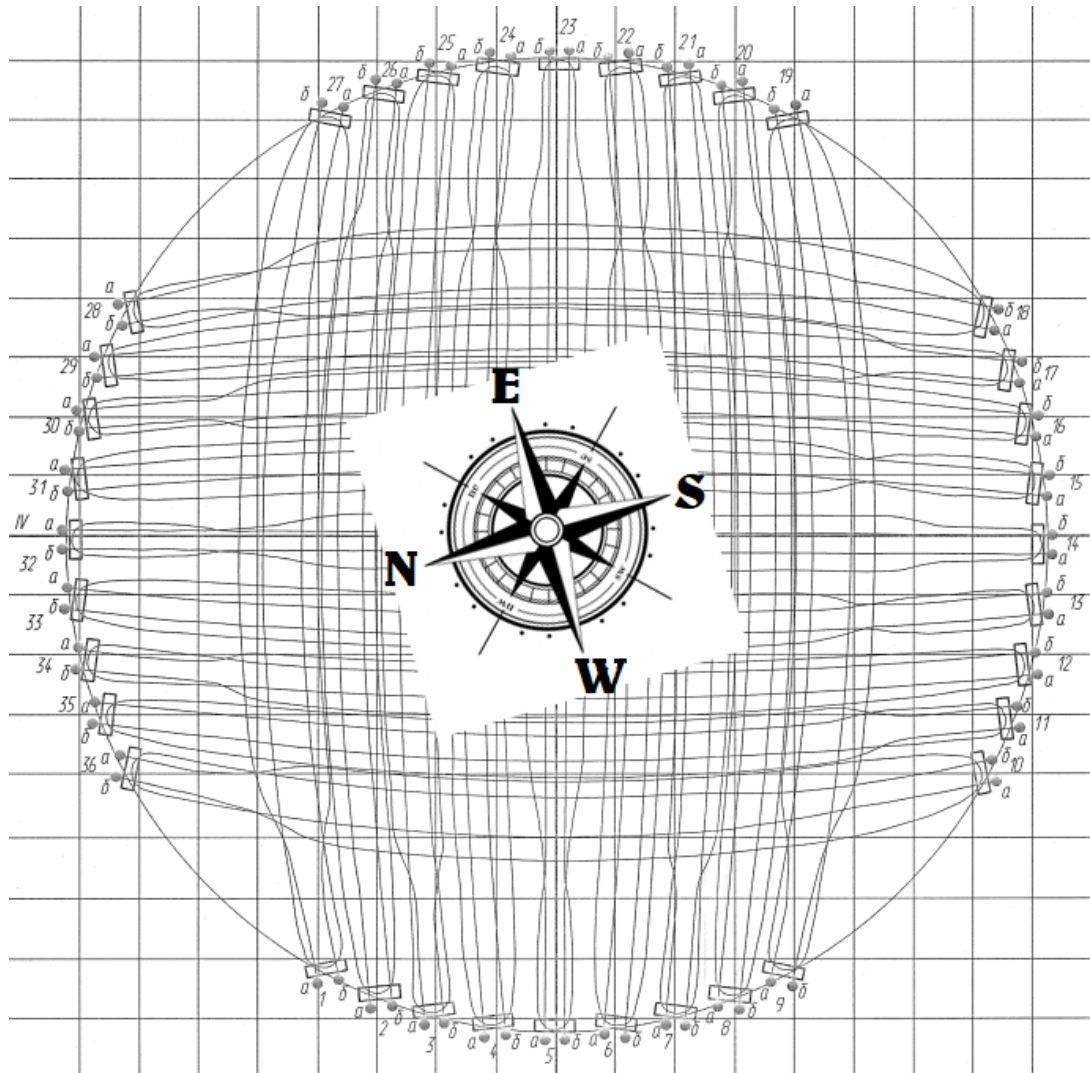


Рисунок 2.12 – Розміщення АК купольної частини захисної оболонки

Порівнюючи архівні дані зусиль натягу арматурних канатів гільзи яких знаходяться на південному (сонячному) боці (рисунок 2.13) з даними зусиль натягу арматурних канатів гільзи яких знаходяться на північному (тіньовому) боці (рисунок 2.14), було виявлено що температура суттєво впливає на вимірювальну ділянку системи яка розміщена на гільзі анкерного пристрою.

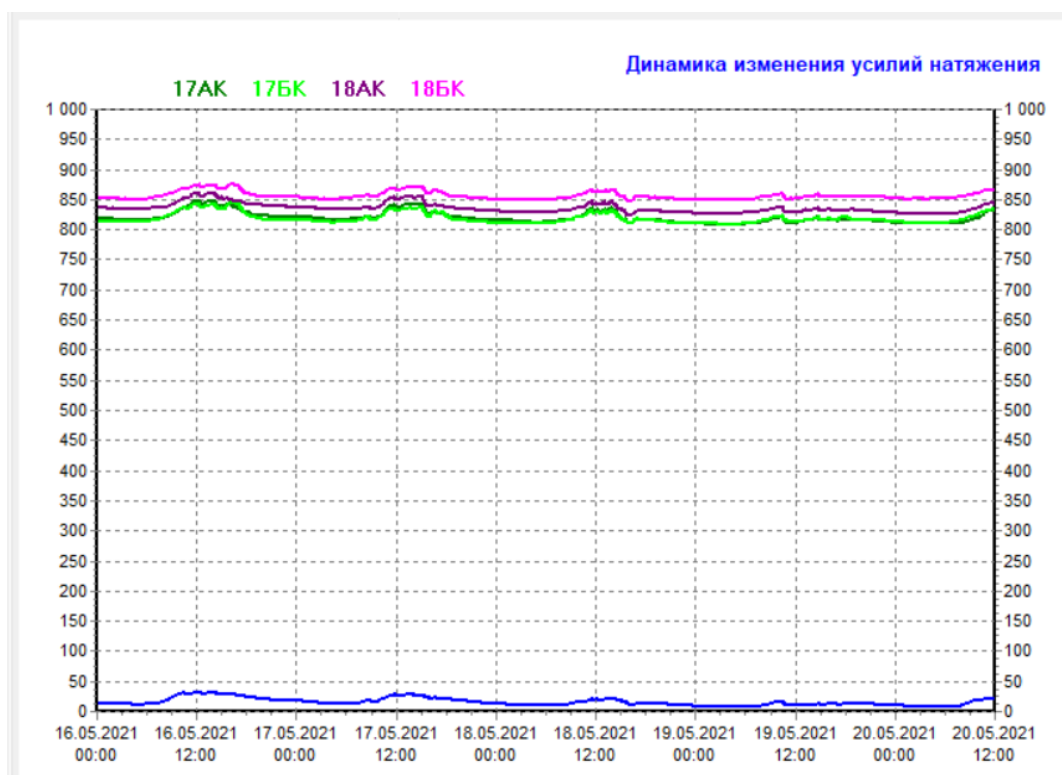


Рисунок 2.13 – Динаміка зміни зусиль натягу АК на південній частині куполу.

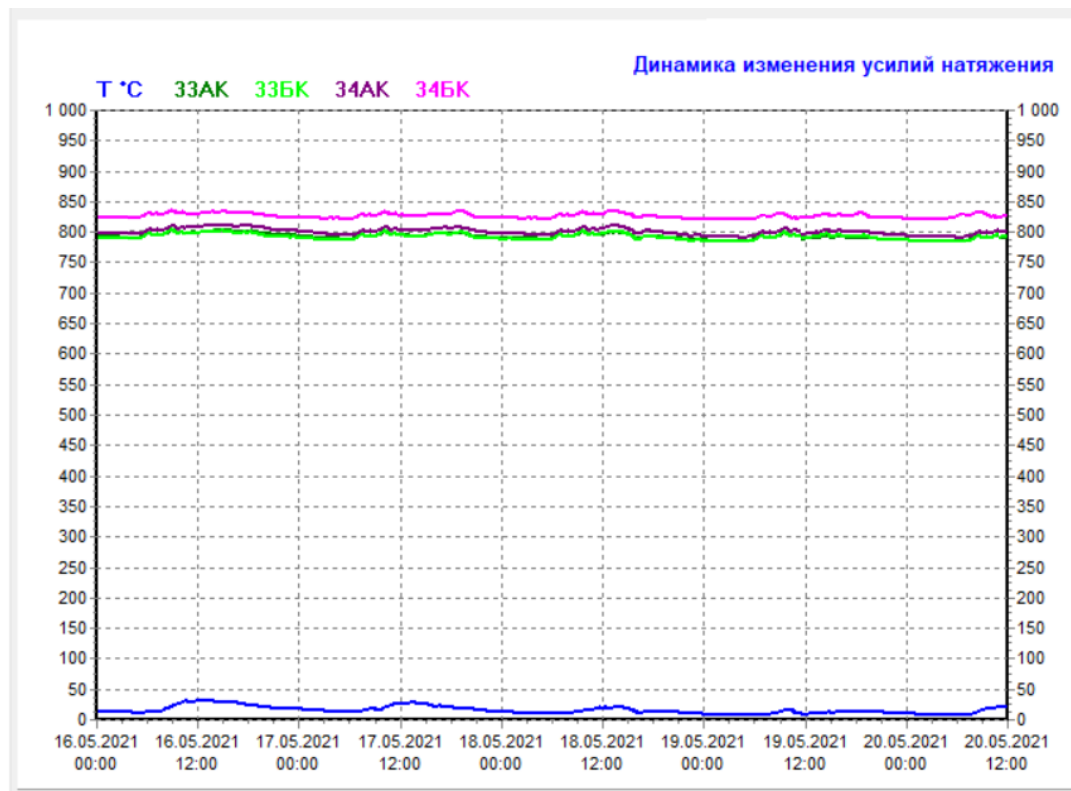


Рисунок 2.14– Динаміка зміни зусиль натягу АК на північній частині куполу.

Після детального порівняння архівних даних за 16.05.2021 протилежно розташованих армоканатів – південного (17БК) та північного (33АК) (рисунок 2.15) було виявлено, що максимальні добові відхилення на південній частині $\Delta F=33$ т.с., а на північній $\Delta F=10$ т.с.

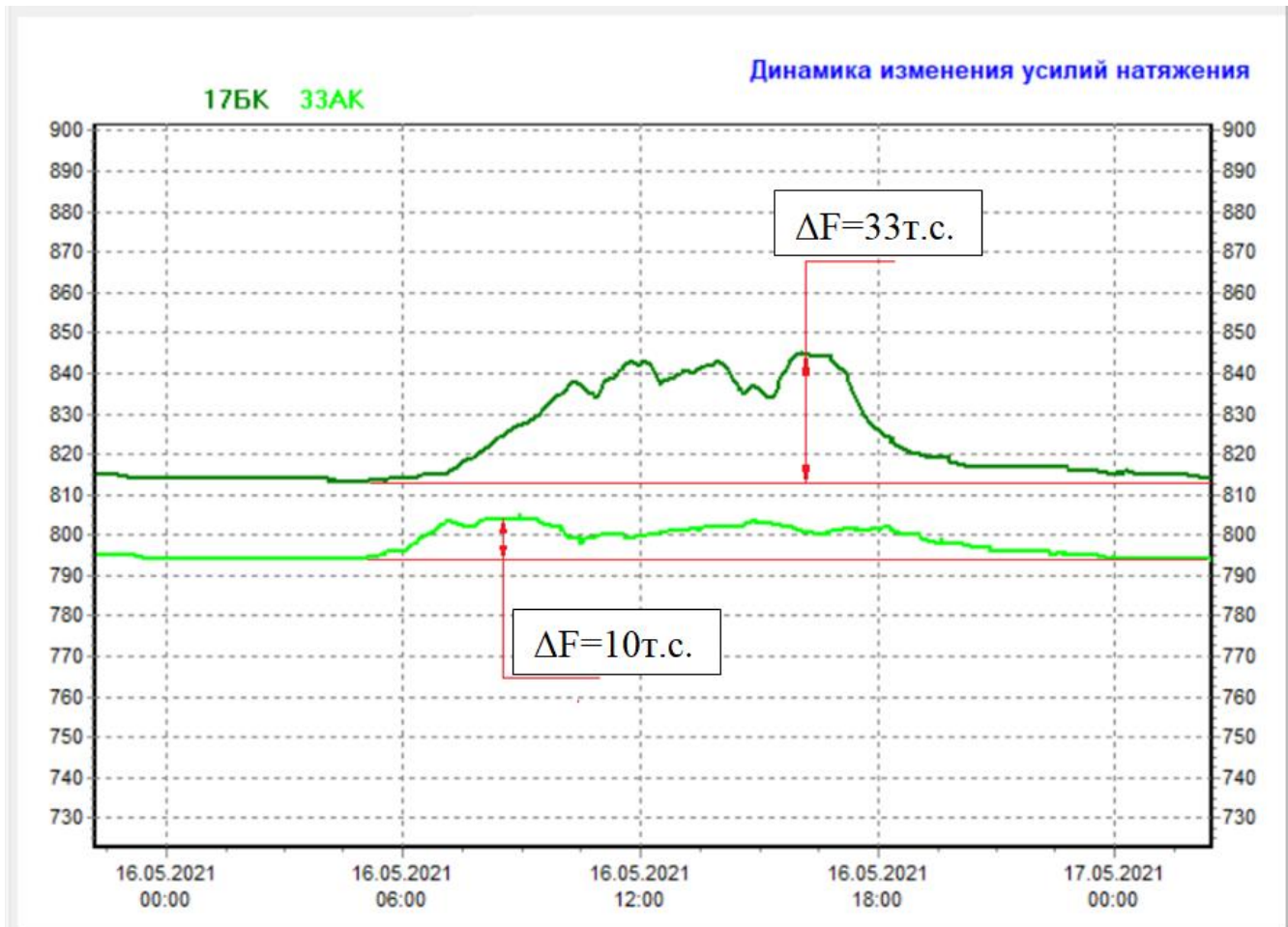


Рисунок 2.15 – Максимальні добові відхилення вимірювання зусиль натягу АК.

Способом вирішення даної проблеми може бути внесення змін до розрахункової частини програми «Дистанционный контроль усилий натяжения армоканатов». Прикладом зміни програми може бути розроблений в середовищі MATLAB скрипт, який вносить до програми температурну компенсацію похибки вимірювання (рисунок 2.16).

Для розрахунків була використана емпірична формула:

$$F = KF_{dim}$$

де: F – дійсне значення зусилля натягу арматурного канату,

K – коефіцієнт температурної компенсації,

F_{dim} – опосередковано виміряне зусилля натягу арматурного канату.

```

1 Ts=27; % Ts-температура навколишнього середовища на південному боці термооболонки
2 a1=0.0015; % a1, b1 - емпіричні коефіцієнти пропорційності при Ts<20
3 a2=0.002; % a1, b2 - емпіричні коефіцієнти пропорційності при Ts>20
4 b1=0.988;
5 b2=0.932;
6 Fdim=844; % Fdim-опосередковано виміряне зусилля натягу армканата
7 K1=Ts*a1+b1; % K1-коефіцієнт температурної компенсації розширення гільзи при T<20°C
8 K2=Ts*a2+b2; % K2-коефіцієнт температурної компенсації розширення гільзи при T>20°C
9 if Ts==20
10     K=1;
11 end
12 if Ts<20
13     K=K1;
14 end
15 if Ts>20
16     K=K2;
17 end
18 F=Fdim*K; % F-дійсне значення зусилля натягу армканата з врахуванням температурної компенсації
19 if F<761
20     disp(' Менше')
21     F=Fdim*K;
22 end
23 if F>761&&F<850
24     disp(' Норма')
25     F=Fdim*K;
26 end
27 if F>850
28     disp(' Вільше')
29     F=Fdim*K;
30 end

```

Name	Value
a1	0.0015
a2	0.0020
b1	0.9880
b2	0.9320
F	832.1840
Fdim	844
K	0.9860
K1	1.0285
K2	0.9860
Ts	27

Рисунок – 2.16 Скрипт «Температурна компенсація» в середовищі Matlab

Коефіцієнт температурної компенсації залежить від температури навколишнього середовища, коефіцієнтів теплового розширення, лінійних розмірів гільзи анкерного пристрою та довжини арматурного канату, для цього в розрахунки було введено емпіричні коефіцієнти пропорційності a_1 , a_2 , b_1 , b_2 . Слід зауважити що $K = 1$ в тому випадку коли відоме істинне значення зусилля натягу F' арматурного канату при певній температурі T' . Істинне значення зусилля натягу АК вимірюється під час контрольно-

профілактичних робіт під час проведення планового попереджувального ремонту енергоблоку за допомогою гідравлічного домкрату ДГ-650/1200. Згідно протоколів вимірюваних зусиль на арматурному канаті 17БК вимірювання проводилося при температурі навколишнього середовища 20°C та становило 827,5 т.с.

Припустимо що K має нелінійну залежність $K = F_{dim}(T)$ (рисунок 2.17).

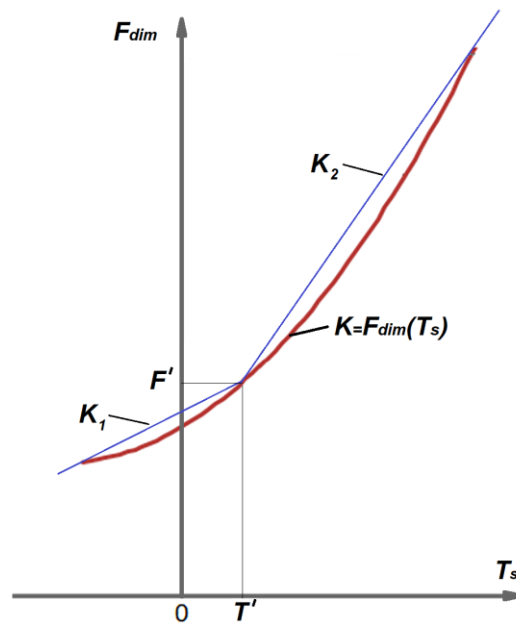


Рисунок 2.17 – Залежність коефіцієнту температурної компенсації від виміряних зусиль та температури

Апроксимуючи дану функцію на дві ділянки отримаємо дві лінійні залежності:

$$K_1 = a_1 T_s + b_1$$

$$K_2 = a_2 T_s + b_2$$

де: a_1, b_1 – емпіричні коефіцієнти пропорційності при $T_s < T'$

a_2, b_2 – емпіричні коефіцієнти пропорційності при $T_s > T'$

T_s – температура на південному боці захисної оболонки

Аналізуючи графік залежності зусиль натягу від температури на арматурному канаті 17БК впродовж 16.05.2021 (рисунок 2.18) виберемо

контрольні точки зусиль та температури виміряні кожні три години (таблиця 2.1).

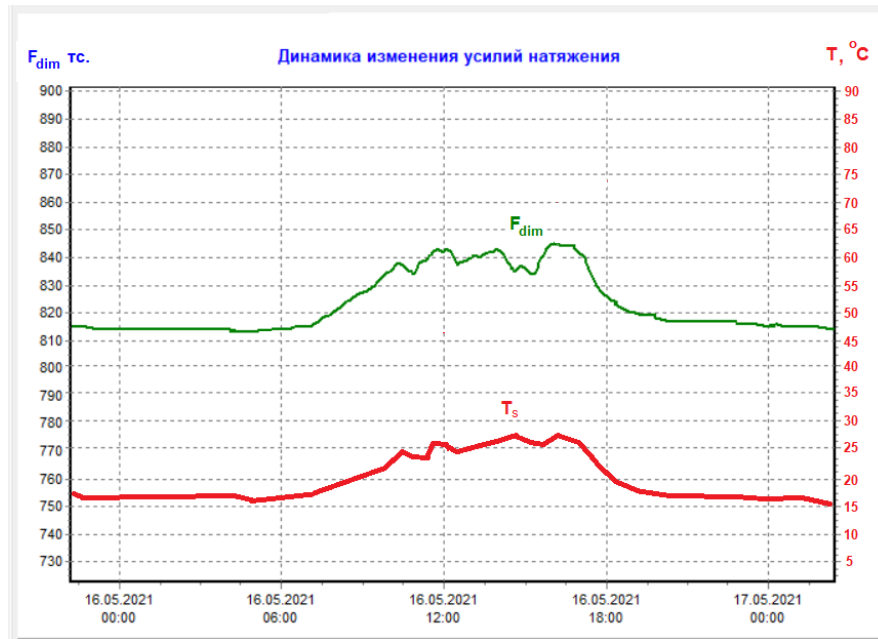


Рисунок 2.18 – Залежність виміряних зусиль від температури

Таблиця 2.1 – Контрольні точки часу, зусиль та температури

t, Г:ХВ	00:00	03:00	06:00	09:00	12:00	15:00	18:00	21:00	00:00
T_s , °C	17	17	18	20	25	27	20	17	16
F_{dim} , Т.С.	815	815	817	828	842	844	827	817	816

Для отримання емпіричних коефіцієнтів пропорційності, побудови графіків та аналізу отриманих даних скористуємось програмою Excel (рисунок 2.19).

При виборі коефіцієнтів $a_1 = 1,5 \times 10^{-3}$; $a_2 = 3 \times 10^{-3}$, $b_1 = 0,983$, $b_2 = 0,983$ було отримано наступні результати:

- Графік розрахованих зусиль $F(t)$ має меншу крутизну в порівнянні з графіком виміряних зусиль $F_{dim}(t)$.

- Виміряні значення F_4 та F_7 при температурі $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ мають різні значення внаслідок теплової інерції, середнє значення яких є істинним та співпадає зі значенням вказаному в протоколі виміряних зусиль під час

проведення контрольно-профілактичних робіт.

$$F_{\text{іст}} = \frac{F_4 + F_7}{2} = \frac{827 + 828}{2} = 827,5 \text{ (т.с)}$$

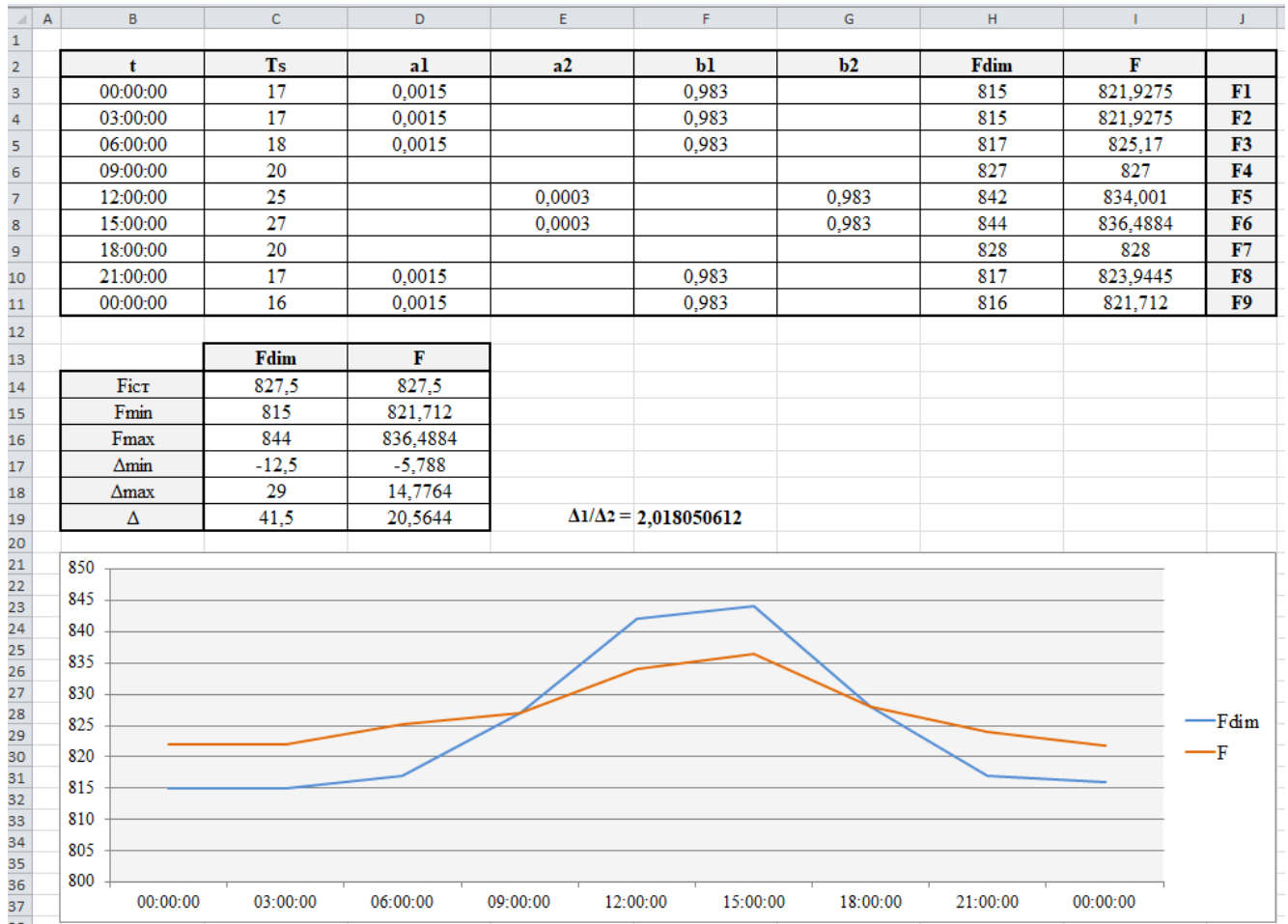


Рисунок 2.19 Емпіричне визначення коефіцієнтів температурної компенсації

- Абсолютне відхилення мінімальних значень $\Delta_{\min} = F_{\min} - F_{\text{іст}}$,

для вимірних зусиль $\Delta_{\min} = -12,5$ т.с;

для розрахованих зусиль $\Delta_{\min} = -5,788$ т.с.

- Абсолютне відхилення максимальних значень $\Delta_{\max} = F_{\max} - F_{\text{іст}}$,

для вимірних зусиль $\Delta_{\max} = 29$ т.с;

для розрахованих зусиль $\Delta_{\max} = 14,78$ т.с.

- Абсолютна похибка вимірювань $\Delta = \Delta_{\max} - \Delta_{\min}$

для вимірних зусиль $\Delta_1 = 41,5$ т.с;

для розрахованих зусиль $\Delta_2 = 20,56$ т.с.

- Відносна точність вимірювань $\frac{\Delta_1}{\Delta_2} \approx 2$.

При обраних коефіцієнтах температурної компенсації відносна точність вимірювань збільшилась в два рази. Після численних ітерацій вдалося отримати наступні результати що зображені на рисунку 2.20.

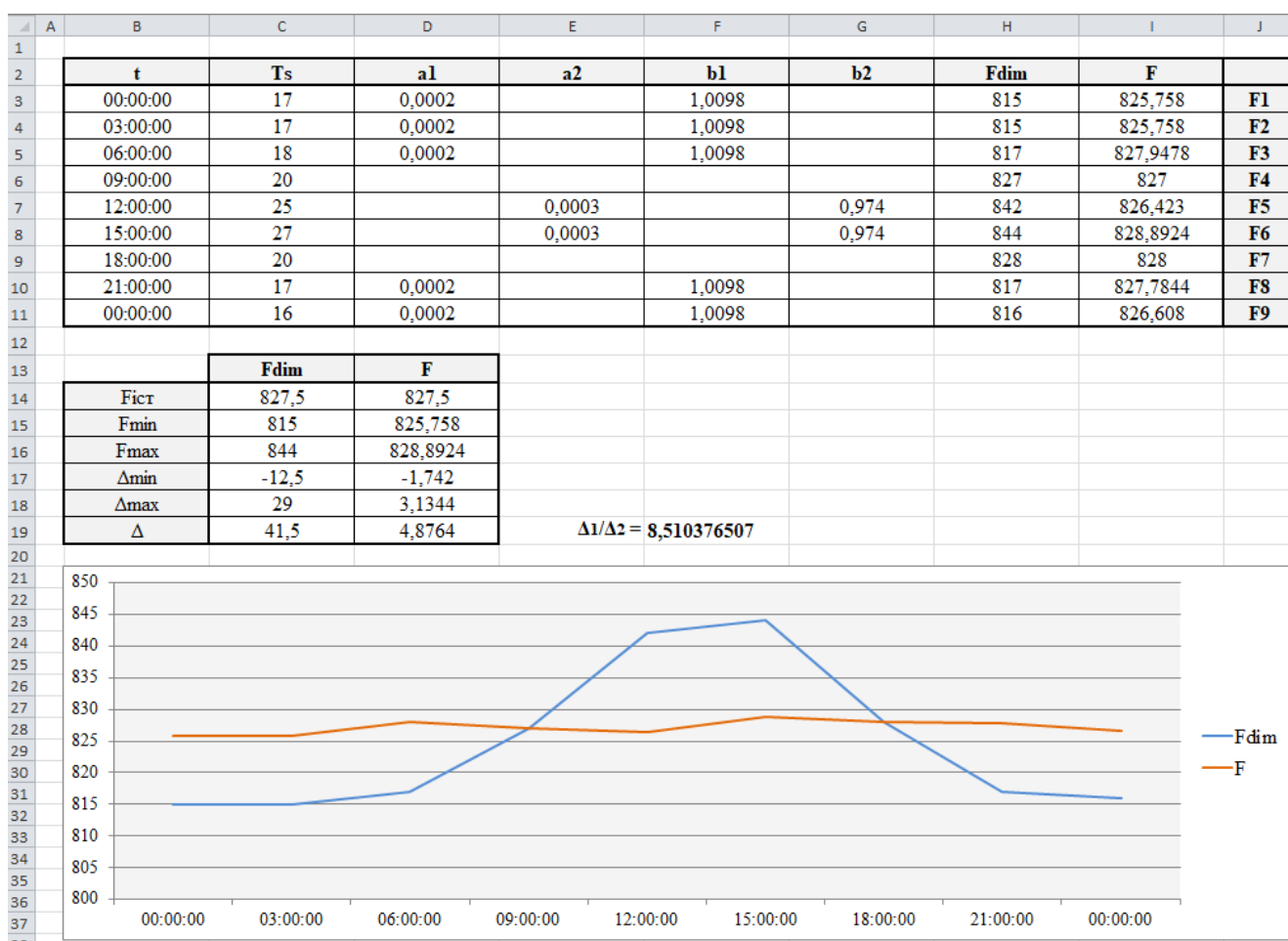


Рисунок – 2.20 Визначення оптимальних коефіцієнтів температурної компенсації

При виборі коефіцієнтів $a_1 = 2 \times 10^{-4}$; $a_2 = 3 \times 10^{-4}$, $b_1 = 1,0098$, $b_2 = 0.974$ було отримано наступні результати:

- Графік розрахованих зусиль $F(t)$ в порівнянні з графіком вимірних зусиль $F_{dim}(t)$ має вигляд майже прямої лінії з невеликими відхиленнями.

- Абсолютне відхилення мінімальних значень $\Delta_{\min} = F_{\min} - F_{\text{іст}}$ для розрахованих зусиль $\Delta_{\min} = -1,74$ т.с.

- Абсолютне відхилення максимальних значень $\Delta_{\max} = F_{\max} - F_{\text{іст}}$, для розрахованих зусиль $\Delta_{\max} = 3,13$ т.с.

- Абсолютна похибка вимірювань $\Delta = \Delta_{\max} - \Delta_{\min}$ для розрахованих зусиль $\Delta = 4,88$ т.с.

- Відносна точність вимірювань в порівнянні з існуючою $\frac{\Delta_1}{\Delta_2} \approx 8,5$.

Згідно технічних вимог щодо точності вимірювань границя допустимої похибки вимірювання, не більше $\pm 2,0$ % від найбільшої границі вимірювань що становить 1000 т.с, тобто в абсолютній величині допустима похибка вимірювань ± 20 т.с. В існуючій системі по досліджуваному купольному арматурному канату 17БК абсолютна похибка вимірювань $\frac{+29}{-12,5}$ (завищена верхня допустима границя вимірювань на 9 т.с). Після втілення програмної температурної компенсації абсолютна похибка вимірювань суттєво зменшиться $\frac{+3,13}{-1,74}$ т.с, що в відносній величині 0,3% похибка по верхній межі, та - 0,17% по нижній межі.

У розділі 2 були розглянуті математичні моделі захисних оболонок які дозволяють створити програмне забезпечення для математичних розрахунків фізичних параметрів захисної оболонки, розроблено метод програмної температурної компенсації теплового розширення вимірювальної ділянки вимірювального каналу який дозволяє в 8,5 разів підвищити точність вимірювань в порівнянні з точністю існуючої системи.

3 РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ЗУСИЛЬ АРМАТУРНИХ КАНАТІВ СИСТЕМИ ПЕРЕДНАПРУЖЕННЯ ЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКИ

3.1 Мета та призначення розробки системи СДКЗ АК СПЗО

Переважна більшість енергоблоків українських АЕС будувалися у 80-ті та 90-ті роки минулого сторіччя, строк експлуатації, який був закладений проектом, складає 30 років. Проектний термін експлуатації українських енергоблоків вже вичерпали 12 із 15 наявних у країні. Кожні 10 років ДП НАЕК «Енергоатом» проводить переоцінку безпеки кожного енергоблоку та ресурсу обладнання. За результатами оцінки безпеки встановлено, що строк експлуатації може бути продовжений ще як мінімум на 20 років за умови модернізації систем безпеки та деякого обладнання, для досягнення відповідності сучасним світовим вимогам. Однією з умов продовження строку експлуатації енергоблоків є встановлення системи дистанційного контролю арматурних канатів системи переднапруження захисної оболонки. Крім того в 2019 Енергоатом ухвалив стратегічне рішення про відновлення проекту добудови енергоблоків № 3 та № 4 Хмельницької АЕС. На виконання Указу Президента «Про невідкладні заходи щодо стабілізації ситуації в енергетичній сфері та подальшого розвитку ядерної енергетики» від 22 вересня 2020 року, у частині добудови енергоблоків №3 та №4 ХАЕС, 31 серпня 2021 року ДП НАЕК "Енергоатом" та американська компанія Westinghouse підписали меморандум про будівництво енергоблоку Хмельницької АЕС як пілотного проекту. В планах до 2040 року «Енергоатом» планує побудувати 14 нових атомних енергоблоків на яких для контролю захисної оболонки також буде встановлена система СДКЗ АК СПЗО.

Розробка системи дистанційного контролю зусиль в арматурних канатах системи переднапруження захисної оболонки, що розглядається в

даній роботі, призначена для модернізації існуючих систем контролю та має на меті:

- вдосконалення існуючих систем дистанційного контролю зусиль натягу арматурних канатів які є складовою частиною системи переднапруження захисної оболонки реакторного відділення АЕС;
- розробка цифрових тензометричних датчиків для збільшення точності вимірювань в порівнянні з аналоговими що використовуються в існуючих системах;
- розробка вимірювального каналу та структурної схеми СДКЗ АК СПЗО;
- зменшення собівартості, економії ресурсів та працевитрат під час монтажу, пуско-налагоджувальних роботах, під час технічного обслуговування та експлуатації.

3.2 Вимоги до первинних перетворювачів зусиль. Розробка схеми цифрового тензометричного датчика

Згідно технічних вимог що ставляться до ППЗ (датчиків) вони повинні монтуватися на анкерних пристроях армоканатів, виключаючи внесення змін в конструкцію та роботу існуючих деталей (елементів) анкерних вузлів АК, тобто бути накладного типу. Для датчиків зусиль натягу армоканатів та ВК повинна бути збережена працездатність при вологості до 100% при температурі $+30^{\circ}\text{C}$ та при вмерзанні з'єднувальних кабелів в лід.

Конструкція ППЗ не повинна вимагати внесення змін в конструкцію існуючих деталей (елементів) анкерних вузлів АК і повинна забезпечувати його установку та демонтаж на анкерні пристрої армоканатів без демонтажу встановленого АК. Повинні бути передбачені спеціальні пристосування, що забезпечують монтаж, демонтаж ППЗ.

Умови навколишнього середовища для ППЗ, встановлюваних поза приміщеннями на захисній оболонці, наступні:

- температура навколишнього повітря від мінус 40 до $+60^{\circ}\text{C}$;

- | | |
|--|------------------------|
| – атмосферний тиск | від 84,0 до 106,7 кПа; |
| – відносна вологість при + 30 ⁰ С | до 100 %; |
| – вміст пилу | необмежено; |
| – час існування режиму | постійно. |

Враховуючи технічні вимоги до ППЗ, та максимально допустимі розміри посадочного місця (виміряні за місцем встановлення датчиків), можна визначити габаритні розміри, форму датчика та ступінь захисту від вологи. Допустимі розміри: довжина 120мм; ширина 85 мм; висота 50 мм.

Ступінь захисту від вологи обираємо згідно найгірших умов експлуатації. Такими умовами є 100% вологість при температурі 30⁰С.

Існує система класифікацій, що забезпечує захист корпусу електрообладнання. Ця система називається Ingress Protection Rating, скорочено – IP. Система IP стандартизована міжнародним стандартом ІЕС 60529.

IP визначає, який рівень захисту від проникнення може забезпечувати корпус пристрою. При цьому ступінь захисту визначається двома цифрами після літер "IP". Перша – це ступінь захисту від проникнення твердих предметів, а друга – від попадання вологи. Обираємо захист IP67 – пилонепроникний корпус з повним захистом від пилу, захист від води під час занурення пристрою .

За допустимими розмірами, максимальними навантаженнями та показниками надійності обираємо промисловий тензодатчик S-подібного типу які виготовляються фірмами Zemic або CAS, які є провідними виробниками та розробниками тензодатчиків, датчиків натягу та сили (рисунок 3.1). Згідно з технічним паспортом [20] обираємо модель датчика фірми Zemic розрахованого на навантаження 50кг – H3-C3-50kg-3B.



Рисунок 3.1 – Тензорезисторні s-подібні датчики

Габаритні розміри датчика, вказані на рисунку 3.2, дозволяють розмістити його в корпусі разом з печатною платою АЦП в середині корпусу.

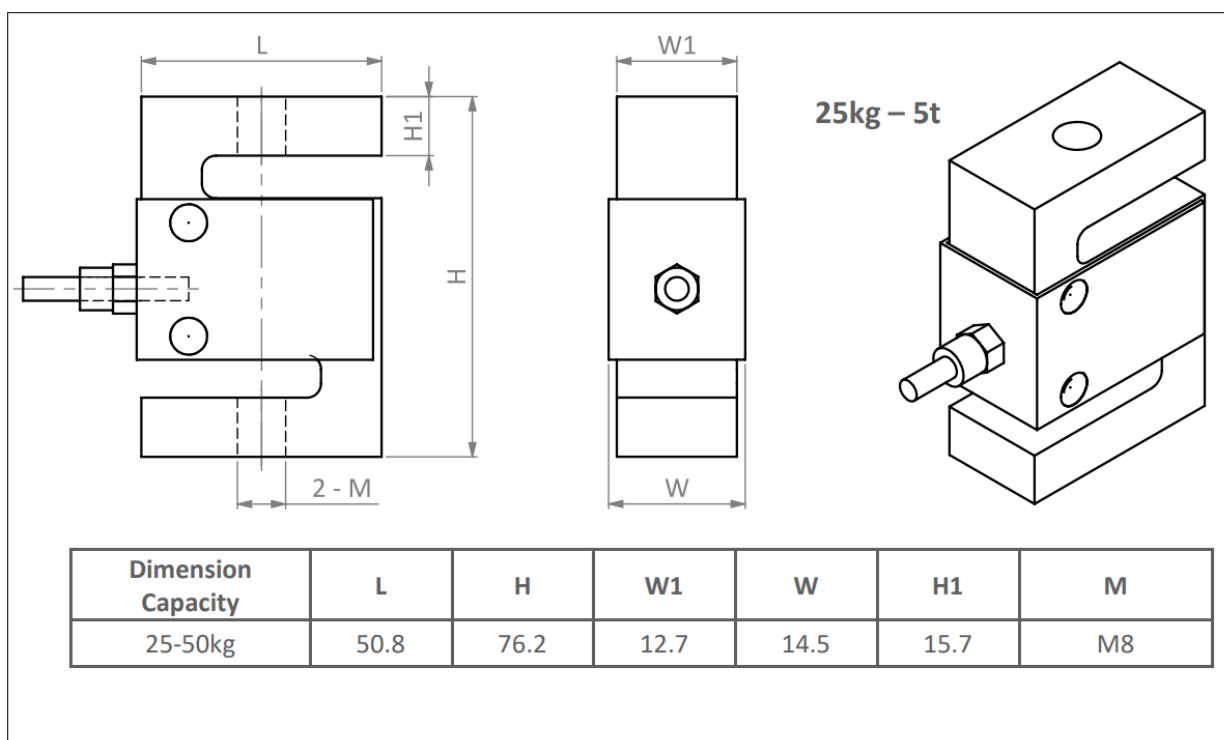


Рисунок 3.2 – Габаритні розміри датчика H3-C3-50kg-3B

Електрична схема 4-провідного підключення тензорезисторного датчика наведена на рисунку 3.3.

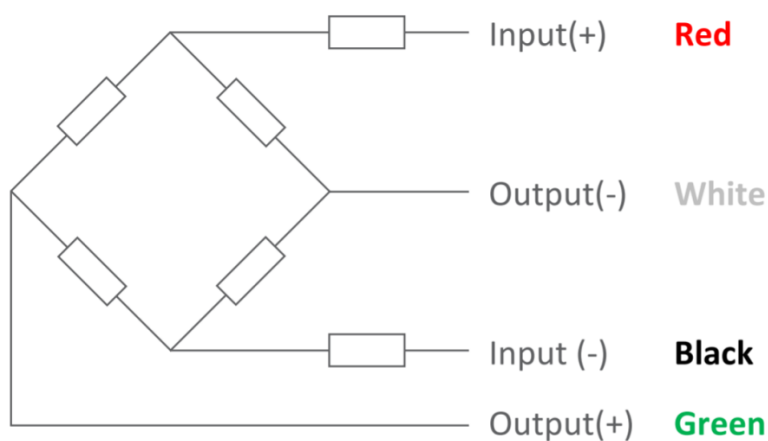


Рисунок 3.3 – Електрична схема підключення датчика НЗ-СЗ-50kg-3В

Тензорезисторний датчик є первинним перетворювачем зусиль в схемі цифрового тензометричного датчика (ЦТД), блок - схему якого наведено на рисунку 3.4.

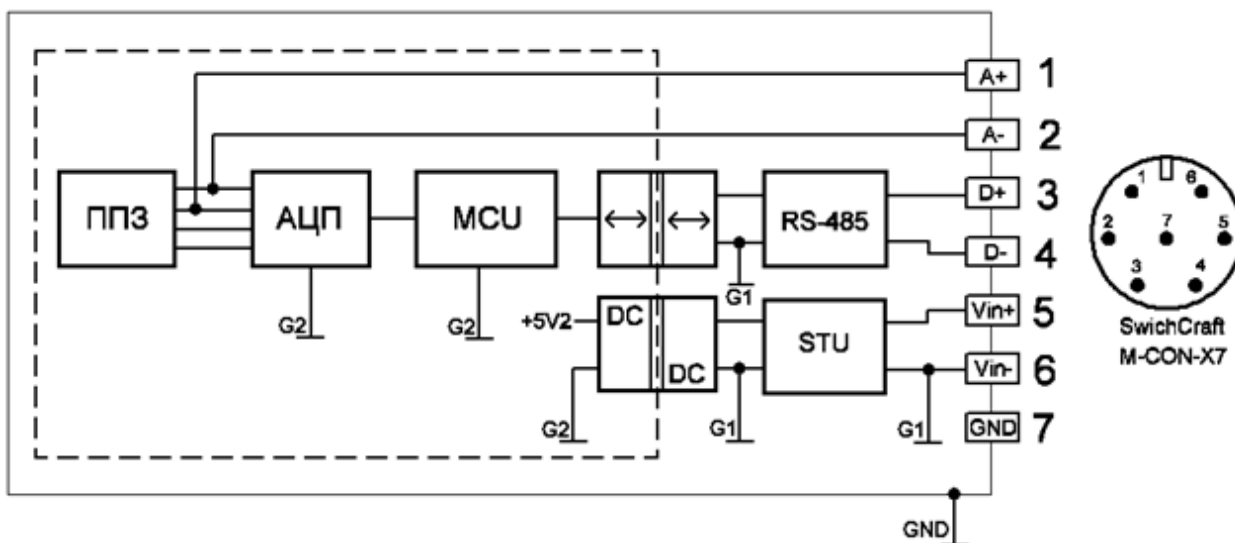


Рисунок 3.4 – Блок - схема цифрового тензометричного датчика (ЦТД)

Призначення контактів роз'єму:

- 1–2 – аналоговий вихідний сигнал ППЗ;
- 2–3 – контакти Data+ Data- – цифровий вихідний сигнал;
- 5–6 – живлення напругою 12...24В постійного струму.
- 7 – екран, земля.

Принцип дії ЦТД полягає в сприйнятті первинним перетворювачем

зусиль шунтованого зусилля від гільзи анкерного пристрою арматурного канату, під дією прикладеної сили в ППЗ відбувається деформація тензорезистора, що входить до одного з плечей вимірювального моста Уїтстона, внаслідок зміни опору тензорезистора виникає різниця потенціалів на середніх точках вимірювального моста.

Зв'язок між навантаженням та вихідною напругою тензодатчика розраховується за формулою (3.1):

$$U_{\text{вих}} = \frac{\gamma \cdot U_{\text{ж}} \cdot F_x}{F_{\text{ном}}} \quad (3.1)$$

де: $U_{\text{вих}}$ – напруга на виході тензодатчика;

γ – робочий коефіцієнт перетворення;

$U_{\text{ж}}$ – напруга живлення;

F_x – сила прикладена до тензодатчика;

$F_{\text{ном}}$ – номінальне навантаження тензодатчика.

Сигнал з виходу тензодатчика надходить на вхід аналого-цифрового перетворювача (АЦП), де здійснюється ратіометричний вимір вихідної напруги тензодатчика, тобто код АЦП – $N_{\text{АЦП}}$ (3.2) пропорційний не абсолютному значенню напруги, а його відношенню до напруги живлення:

$$N_{\text{АЦП}} = \frac{K_{\text{АЦП}} \cdot U_{\text{вих}}}{U_{\text{ж}}} \quad (3.2)$$

де: $N_{\text{АЦП}}$ – код АЦП;

$K_{\text{АЦП}}$ – коефіцієнт перетворення АЦП.

Значення коефіцієнтів, що входять до формул 3.1 і 3.2, є константи які притаманні кожному окремому датчику та точне значення яких не відомо. Тому експлуатація ЦТД передбачає попереднє калібрування - встановлення значень реальної характеристики перетворення.

Цифрові коди надходять у мікроконтролер (MCU) і піддаються там цифрової фільтрації та масштабуванню.

Живлення ЦТД здійснюється від стабілізатора STU, який перетворює вхідну напругу живлення 12...24 В на стабілізовану напругу 5 В. Далі ця

напруга через гальванічно розв'язаний стабілізатор - перетворювач (DC/DC) подається на мікроконтролер і АЦП.

Робота із зовнішнім контролером або комп'ютером здійснюється за інтерфейсом RS-485. Для узгодження фізичних рівнів служить драйвер RS-485 з гальванічною розв'язкою від вимірювальних ланцюгів та мікроконтролера, але не від джерела живлення тензоконтролера.

В схемі ЦТД передбачено контроль аналогового сигналу для зручності настройки та контролю попереднього навантаження датчика.

Споживна потужність цифрового тензометричного датчика – 5Вт.

3.3 Розробка пристрою контролю попереднього напруження датчика

Під час регламентованого технічного обслуговування ЦТД проводиться зняття датчиків з гільзи анкерного пристрою АК для проведення метрологічної перевірки з метою виявлення перевищення граничних відхилень та похибок вимірювання. Після успішної перевірки датчики встановлюються на штатні місця та проводиться їх попереднє навантаження елементом силовведення.

Для зручності настройки попереднього навантаження ЦТД було розроблено пристрій контролю попереднього навантаження (ПКПН).

ПКПН було спроектовано на основі схеми підвищуючого конвертера постійної напруги (DC-DC) з використанням мікросхеми MC34063A. Серія мікросхем MC34063A/E - це монолітна схема управління, яка виконує основні функції для перетворення напруги постійного струму[21]. Пристрій містить опорний компенсатор внутрішньої температури, компаратор, осцилятор, керований робочим циклом, з ланцюгом обмеження активного струму, драйвер та вимикач високого струму (рисунок 3.5). Назви та призначення виводів мікросхеми MC34063A відображені в таблиці 3.1.

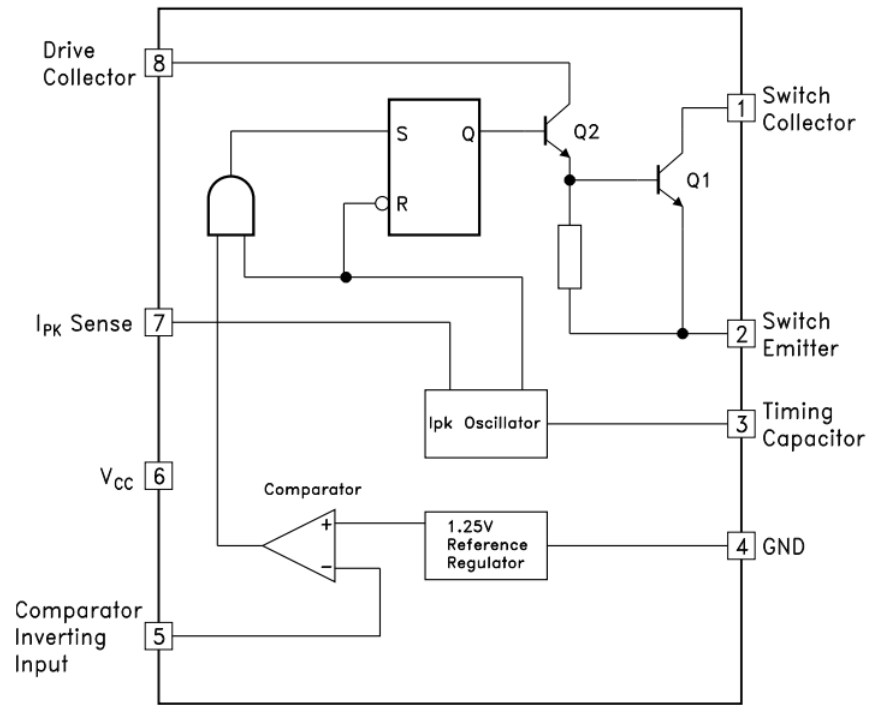


Рисунок 3.5 – Структурна сема MC34063A

Таблиця 3.1– Назви та призначення виводів MC34063A

№ виводу	СИМВОЛ	Назва та призначення	
1	SWC	Switch collector	Колектор перемикача
2	SWE	Switch emitter	Емітер перемикача
3	TC	Timing capacitor	Частотноутворюючий конденсатор
4	GND	Ground	Земля
5	СІІ	Comparator inverting input	Інвертуючий вхід компаратора
6	V _{CC}	Voltage supply	Напруга живлення
7	I _{PK}	I _{PK} sense	Значення пікового току
8	DRC	Voltage driver collector	Драйвер напруги колектора

Застосовуватися мікросхема може в одному з трьох режимів

конвертера: підвищення напруги (Step-Up), пониження напруги (Step-Down) та інвертор напруги (Voltage Inverting). Для забезпечення живлення датчика стабілізованою постійною напругою було обрано схему підвищення напруги Step-Up (рисунок 3.6).

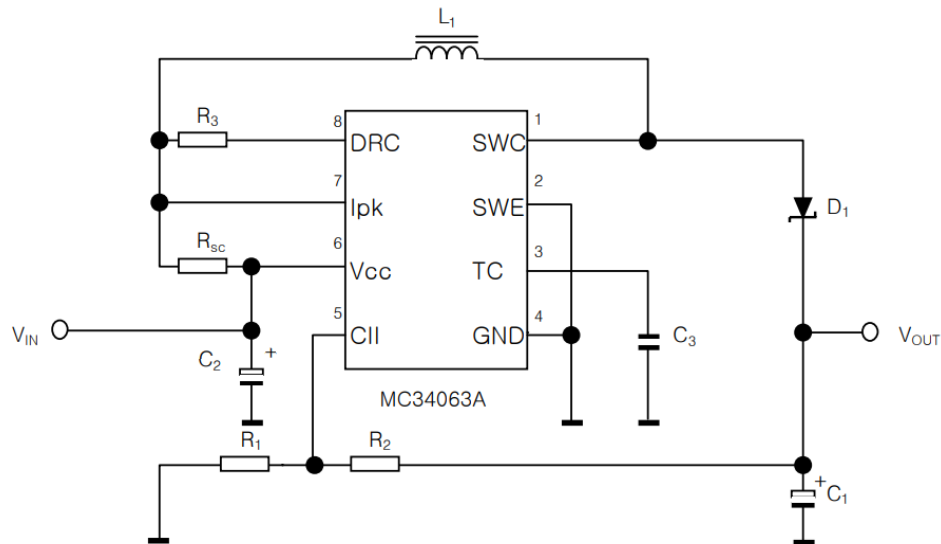


Рисунок 3.6 – Типова схема застосування MC34063A (режим Step-Up)

Для обчислення параметрів конвертера та визначення номінальних значень зовнішніх елементів схеми застосовуються формули для розрахунку які зазначені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Формули для розрахунку номінальних значень елементів конвертера

Параметр	Одиниця вимірювання	Розрахунок
Прогальність імпульсу	t_{on}/t_{off}	$\frac{V_{OUT} + V_F - V_{IN(min)}}{V_{IN(min)} - V_{sat}}$
Період імпульсу	$(t_{on} + t_{off})_{max}$	$1/f_{min}$
Ємність частотоутворюючого конденсатора	C_T	$4,5 \times 10^{-5} t_{on}$
Піковий ток через котушку індуктивності	$I_{PK(switch)}$	$2I_{out(max)} [(t_{on}/t_{off}) + 1]$
Опір обмежувального резистора	R_{SC}	$0,3/I_{PK(switch)}$

Продовження таблиці 3.2

Ємність фільтруючого конденсатора	C_o	Φ	$\frac{I_{out}t_{on}}{V_{ripple(p-p)}}$
Мінімальна індуктивність катушки	$L_{(min)}$	Γ_H	$\frac{V_{IN(min)} - V_{sat}}{I_{PK(switch)}} \times t_{on}$
Напруга на виході конвертера	V_{OUT}	B	$1,25(1 + R_2/R_1)$

де V_{sat} - напруга насичення вихідного вимикача;

V_F - пряме падіння напруги вихідного випрямляча;

V_{IN} - номінальна вхідна напруга;

V_{OUT} - вихідна напруга;

I_{OUT} - вихідний струм;

f_{min} - мінімальна частота виходу при вибраних значеннях V_{IN} та I_{out} ;

$V_{ripple(p-p)}$ - вихідна напруга пульсацій на виході від піку до піку.

Принципову схему ПКПН зображено на рисунку 3.7. Для контролю стабілізованої вихідної напруги та працездатності ПКПН в типову схему конвертера було введено індикацію контролю вихідної напруги з застосуванням двох компараторів D2, D3 та світлодіодів, які сигналізують про низьку напругу на виході (відсутність свічення), нормальну робочу напругу (свічення зеленого світлодіоду HL1), підвищена вихідна напруга (свічення червоного світлодіоду HL2). Для попередження пошкодження датчика напругою, яка перевищує максимально допустиму робочу напругу, в пристрій додатково введений супресор VD2 та самовідновлювальний запобіжник F1. Перемикач S1 призначений для переключення акумуляторної батареї в режим живлення пристрою або режим зарядки через роз'єм X1. ПКПН через вилку X2 підключається до мікровольтметра, через герметичний роз'єм X3 пристрій з'єднується з ЦТД.

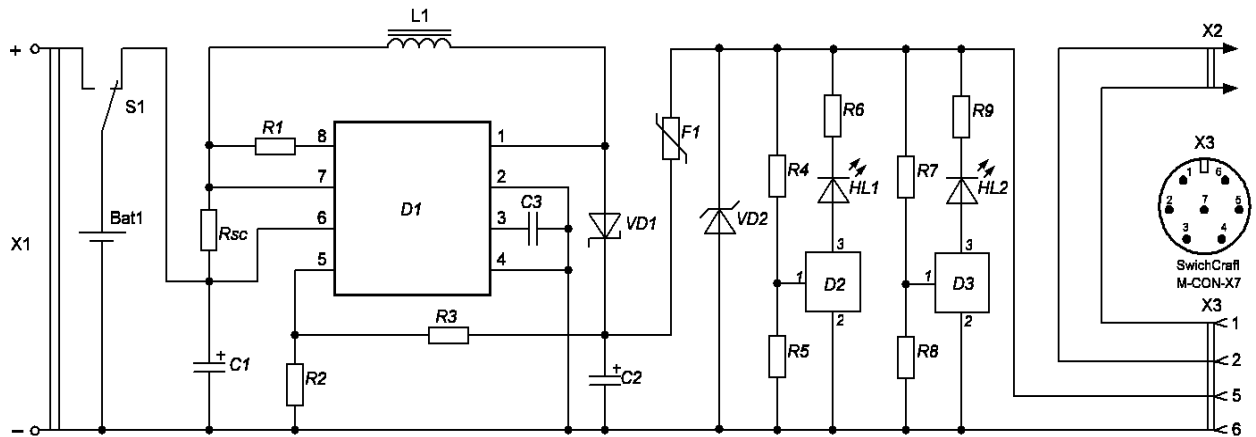


Рисунок 3.7 – Принципова схема ПКПН

3.4 Вимоги до температурних датчиків. Вибір датчиків

Згідно технічних вимог до вимірювальних каналів повинні бути розроблені заходи термокомпенсації показників вимірних зусиль натягу АК. Для реалізації цієї вимоги до складу вимірювального каналу включено чотири хромель – алюмелеві термопари капельного закритого типу Р3410 розраховану на вимірювання температури в діапазоні від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+230\text{ }^{\circ}\text{C}$, що задовольняє вимогам щодо використання в умовах зовнішнього середовища (від $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+60\text{ }^{\circ}\text{C}$).

Для підключення термопари до каналу передачі даних застосовується модуль вводу I-7018 розроблений фірмою ICP DAS [22].

Модуль I-7018 має наступні функції:

- аналого-цифрове перетворення з можливістю дистанційного керування за допомогою набору команд;
- входи з гальванічною розв'язкою 3000В постійного струму.
- 24-розрядний сігма-дельта АЦП, що забезпечує високу точність вимірювань;
- можливість безпосереднього підключення термопари та вбудована компенсація холодного спаю;

– програмна калібровка.

Напруга живлення від 10 до 30 В, споживна потужність 1,0 Вт. Модуль має захист від підключення невірної полярності. Блок-схема модуля I-7018 наведена на рисунку 3.8.

Параметри послідовного зв'язку:

Інтерфейс: RS-485;

Протокол послідовного зв'язку: DCON;

Швидкість передачі даних: від 1200 до 115200 біт/с;

Формат даних: (N, 8, 1), (N, 8, 2), (E, 8, 1), (O, 8, 1)

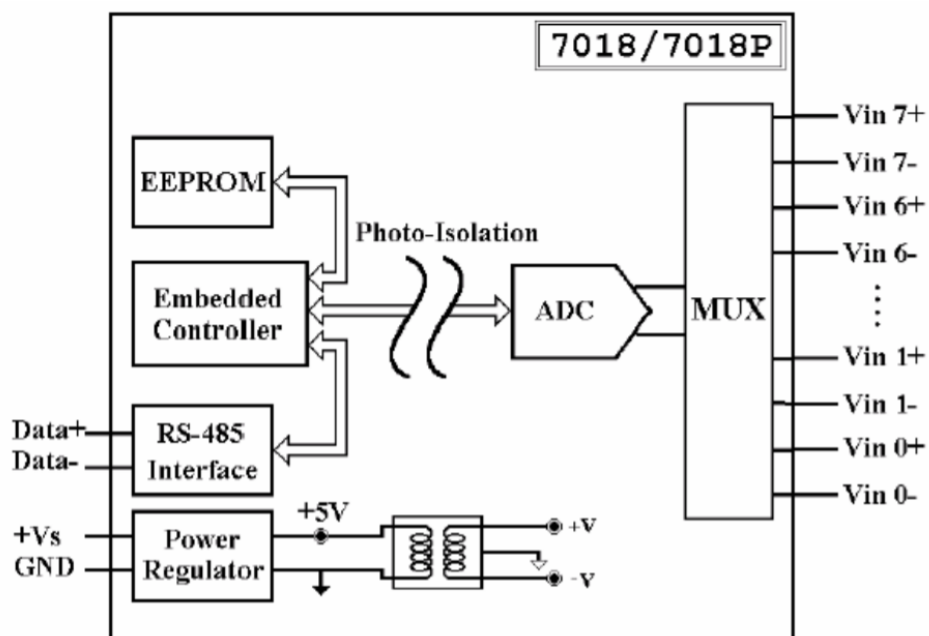


Рисунок 3.8 – Блок-схема модуля I-7018

До складу системи СДКЗ включено 4 температурні датчики які розміщені в чотирьох місцях купольної частини відповідно до сторін горизонту.

3.5 Проектування каналу передачі даних.

Для організації інформаційно-вимірювального каналу було обрано схему з'єднання для мереж на основі стандарту передачі даних по інтерфейсу RS-485

[23]. У стандарті RS-485 для передачі і прийому даних використовується вита пара дротів. Передача даних здійснюється за допомогою диференціальних сигналів. Різниця напруги однієї полярності між провідниками означає логічну одиницю, різниця іншої полярності — нуль. RS-485 забезпечує передачу даних з швидкістю до 10 Мбіт/с. Максимальна дальність залежить від швидкості: при швидкості 10 Мбіт/с максимальна довжина лінії — 120 м, при швидкості 100 кбіт/с — 1200 м. Кількість пристроїв, що підключаються до однієї лінії інтерфейсу, залежить від типу застосованих в пристрої приймачів. Один передавач розрахований на управління 32 стандартними приймачами. Виробляються приймачі з вхідним опором 1/2, 1/4, 1/8 від стандартного. При використанні таких приймачів загальне число пристроїв може бути збільшене відповідно: 64, 128 або 256, але збільшення кількості датчиків призводить до появи високочастотних перешкод в вимірювальному каналі (рисунок 3.9.а). На рисунку 3.9.б показано осцилограму сигналу передавача в правильно організованій мережі.

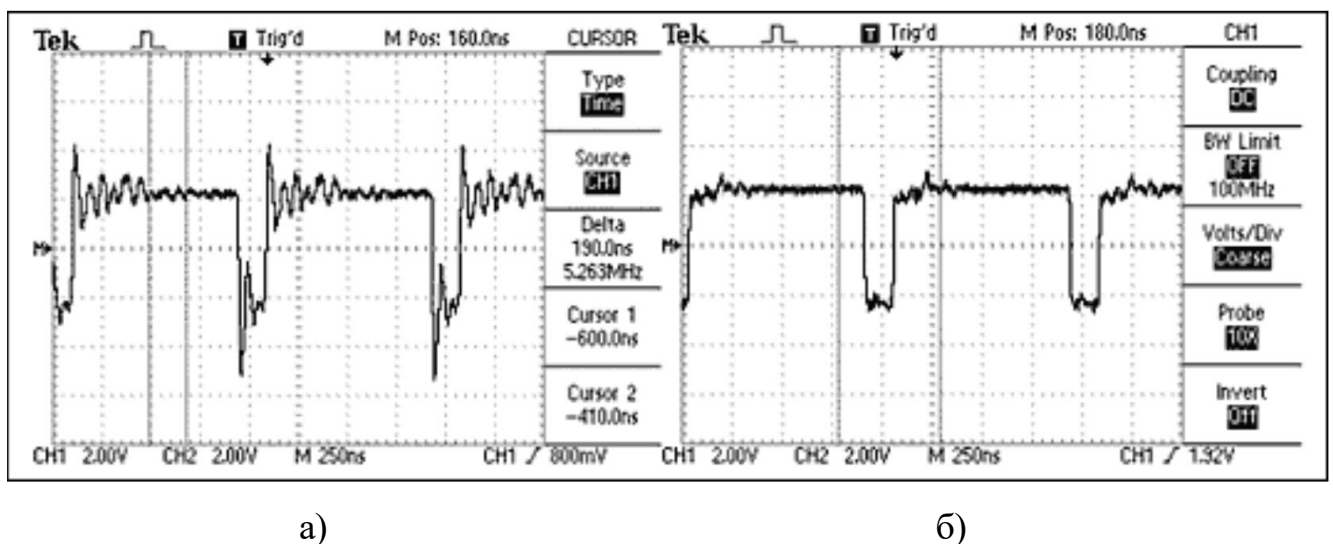


Рисунок 3.9 – Форми сигналів в мережі передачі даних зі стандартом RS-485

Для розрахунку максимальної швидкості передачі даних при проєктуванні каналу передачі даних скористаємося графіком що зображено на рисунку 3.10.

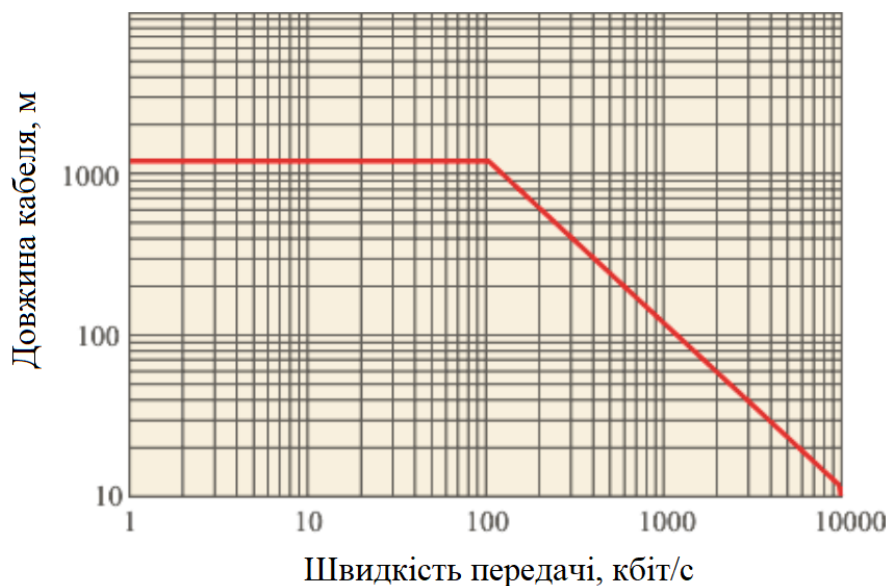


Рисунок 3.10 – Залежність допустимої довжини кабелю від швидкості передачі в мережі зі стандартом RS-485

СДКЗ містить в своєму складі інформаційно – вимірювальний канал з лінією зв'язку довжиною 900 м, що з'єднує промисловий комп'ютер з 264 ЦТД та чотирма температурними датчиками. Велика кількість датчиків та розгалужена схема їх поєднання може спровокувати виникнення ефекту довгих ліній який виникає при передачі височастотних сигналів, внаслідок якого з'являються електромагнітні перешкоди.

Враховуючи особливості вказаного типу передачі даних при проєктуванні СДКЗ, було вирішено розділити канал передачі даних на 12 послідовно з'єднані ділянки що поєднані між собою повторювачами (репітерами) з гальванічним розділенням входу та виходу.

Ділянки каналу передачі даних та розміщення датчиків зображено на рисунку в додатку Г. Розподіл датчиків на ділянках каналу передачі даних наведено в таблиці 3.3.

Таблиця 3.3 – Розподіл датчиків на ділянках каналу передачі даних

Номер ділянки	Датчики	Кількість датчиків	Довжина лінії зв'язку в ділянці, м
1	10АК – 18БК, термодатчик №1	19	45
2	62БЦ – 74АЦ	24	110
3	74БЦ – 86АЦ	24	45
4	19АК – 27БК, термодатчик №2	19	45
5	86БЦ – 2АЦ	24	110
6	2БЦ – 14АЦ	24	45
7	28АК – 36БК, термодатчик №3	19	45
8	14БЦ – 26АЦ	24	110
9	28БЦ – 38АЦ	24	45
10	1АК – 9БК, термодатчик №4	19	45
11	38БЦ – 50АЦ	24	110
12	50БЦ – 62АЦ	24	45

В якості повторювача (репітера) було обрано пристрій розроблений фірмою ICP DAS – I-7510 [24]. Принцип побудови мережи за допомогою повторювача I-7510 показано на рисунку 3.11.

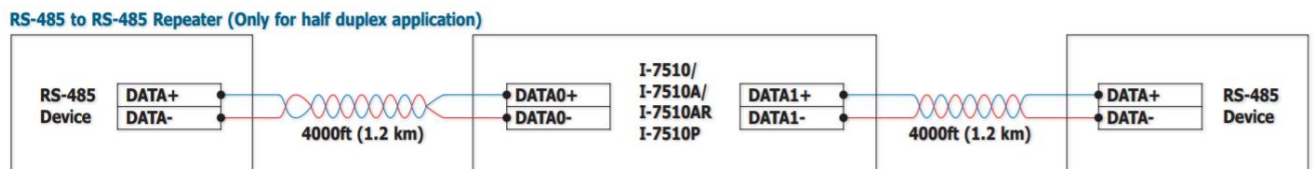


Рисунок 3.11 – Принцип побудови мережи за допомогою I-7510

Умовну схему каналу передачі даних розроблено згідно схеми розміщення датчиків (додаток Г) та зображено на рисунку 3.12. Загальна довжина каналу передачі даних близько 900 метрів, для організації якої

застосовується інформаційний кабель КПВонг-НФЭ-ВП 4х2х0,51 (або аналог) що поєднує промисловий комп'ютер з 264 цифровими тензометричними датчиками, чотирма термодатчиками що поєднуються за допомогою 13 повторювачів I-7510.

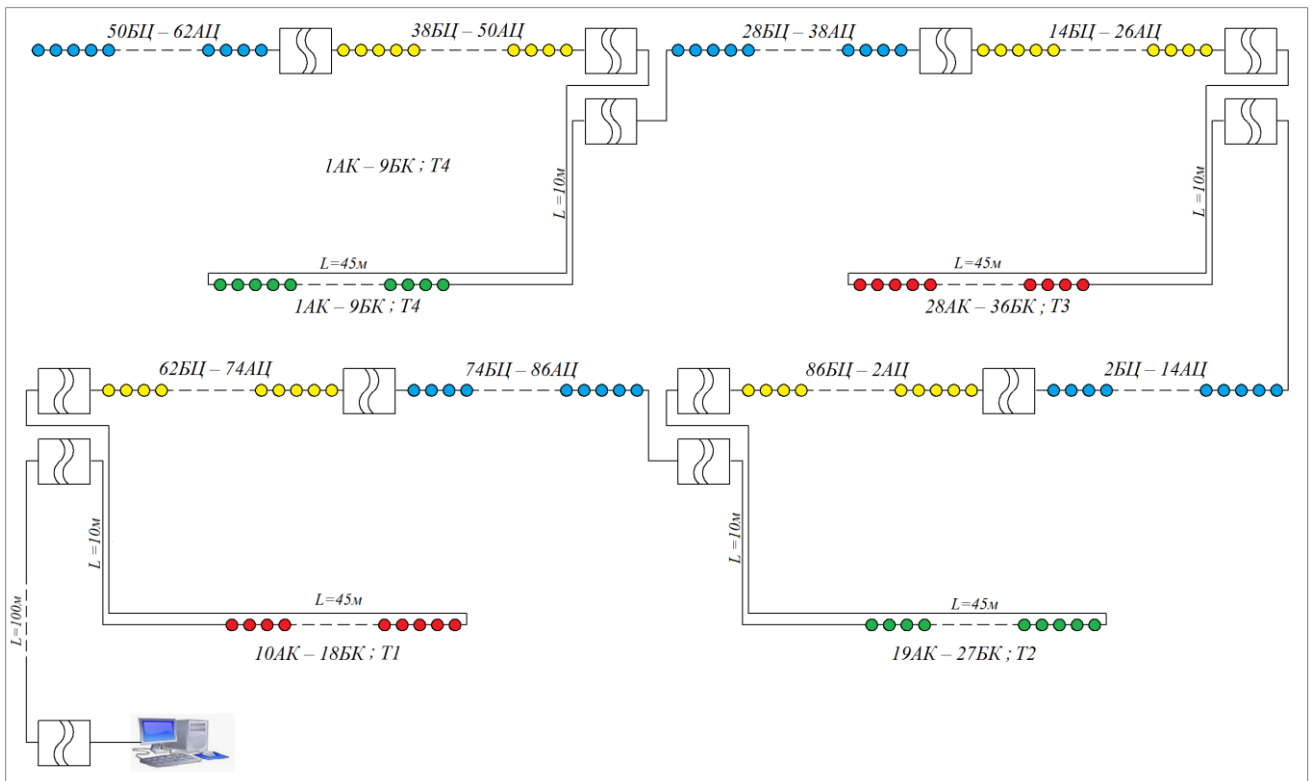


Рисунок 3.12 – Умовна схема каналу передачі даних

3.6 Апаратура обробки даних датчиків системи дистанційного контролю зусиль

Згідно технічних вимог умови експлуатації ПЕОМ та інших елементів СДКЗ повинні відповідати вимогам своєї експлуатаційної документації та бути не гіршими, ніж такі умови:

- температура навколишнього повітря – від 10 °С до 40 °С;
- відносна вологість – від 45 % до 80 % при $t = 25$ °С;
- атмосферний тиск – від 84 кПа до 106,7 кПа;
- вміст пилу – не більш 10 мг/м³;

– час існування режиму – постійно.

Стаціонарна станція приймання та обробки даних на основі дубльованих малогабаритних промислових комп'ютерів що виконує обробку даних з інформаційно-вимірювального каналу повинна відповідати нижче перерахованим вимогам:

- процесор з тактовою частотою не менше 1,4 ГГц, кількістю обчислювальних ядер не менше 2 (двох);
- оперативна пам'ять не менше 1 Гб;
- мережевий контролер типа Ethernet, не менше 100 Мбіт/с;
- кількістю COM портів RS-485 не менше 4 шт.;
- HDD об'ємом не менше 500 Гб;
- контролер USB 2.0 (3.0) з кількістю роз'ємів не менше 2 шт.;
- можливість підключення резервного джерела живлення;
- можливість монтажу в стойку.

Даним вимогам відповідає промисловий комп'ютер MOXA DA-681A-I-DPP.

3.7 Розробка схеми живлення СДКЗ

Згідно технічних вимог живлення технічних засобів станцій прийому та обробки даних повинне здійснюватися від двох незалежних фідерів живлення. У складі технічних засобів повинні бути передбачені пристрої автоматичного вибору резерву живлення (рисунок 3.13). Внутрішні джерела електропостачання повинні витримувати короткочасні перерви в електроживленні (до 5 с) для стабільної роботи комп'ютерів під час перехідних процесів.

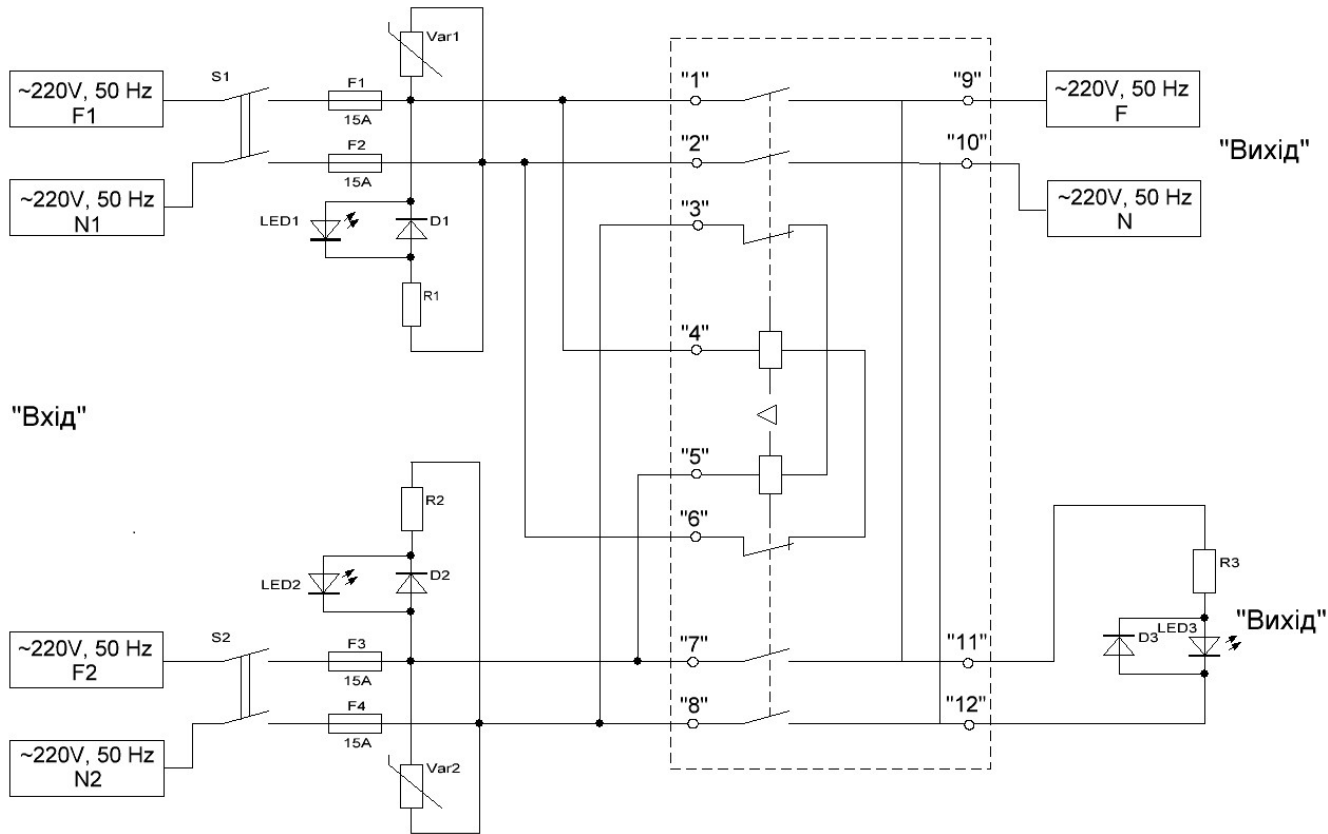


Рисунок 3.13 – Пристрій автоматичного вибору резерву живлення

Напруга електроживлення елементів СДКЗ повинна бути:

- ПЕОМ, промислові комп'ютери та БЖ – (220^{+22}_{-33}) В однофазної мережі змінного струму первинного електроживлення частотою (50 ± 1) Гц;
- датчики – не більше 30 В від БЖ постійного струму;
- пульту контролю зусилля АК – від вбудованого джерела живлення чи від адаптеру (220^{+22}_{-33}) В однофазної мережі змінного струму первинного електроживлення частотою (50 ± 1) Гц.

Для забезпечення живлення інформаційно - вимірювального каналу до якого входять датчики та перетворювачі розташованих на покрівлі реакторного відділення розрахуємо сумарну споживну потужність елементів. Згідно [22], [24] потужність модулів I-7018 та I-7510 – 1Вт та 2,2Вт відповідно. Розрахунок споживної потужності ІВК відображено в таблиці 3.4.

Таблиця 3.4 – Споживна потужність ЦТД та модулів I-7018 та I-7510

Елемент схеми ІВК	Кількість, шт	Споживна потужність, Вт	Сумарна споживна потужність ІВК, Вт
ЦТД	264	5	1320
I-7018	4	1	4
I-7510	12	2,2	26,4
Разом:			1350,4

Згідно структурної схеми СДКЗ живлення елементів інформаційно-вимірювального каналу відбувається завдяки дубльованим блокам живлення PSP-1000-24. Одна пара блоків живлення (БЖ-3 та БЖ-4) живить одну половину ІВК; друга пара блоків живлення (БЖ-5 та БЖ-6) – другу половину ІВК. Призначення блоків живлення та їх потужність зазначено в таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 – Призначення блоків живлення

Умовне позначення на схемі	Тип блоку живлення	Потужність, Вт	Призначення
БЖ-1, БЖ-2	DR-120-24	120	Живлення медіа-конвертерів TP-FO
БЖ-3 – БЖ-6	PSP-1000-24	1000	Живлення ІВК
БЖ-7	RS-25-12	25	Живлення модулів контролю живлення I-7041

3.8 Структура СДКЗ АК СПЗО

Структуру СДКЗ АК СПЗО наведено в додатку Д. Живлення промислових комп'ютерів, консолі, БЖ-1 – БЖ-7 здійснюється через пристрій автоматичного вибору живлення АВР-1, який призначений для надійного живлення від двох незалежних фідерів (фаза А, фаза В).

До складу інформаційно – вимірювального каналу входять 264 цифрових тензометричних датчика (ЦТД); чотири модуля вводу I-7018 (рисунок 3.14) призначених для перетворення аналогового сигналу від чотирьох термопар Р3410 (рисунок 3.15); 13 повторювачів I-7510 (рисунок

3.16) призначених для підсилення сигналу та його фільтрації від високочастотних перешкод.



Рисунок – 3.14 Модуль вводу I-7018



Рисунок – 3.15 Термопара P3410



Рисунок – 3.16 Повторювач інтерфейсу послідовних сигналів I-7510

Модулі I-7041 (рисунок 3.17) призначені для контролю роботи блоків живлення PSP-1000-24 (БЖ-3 –БЖ-6) (рисунок 3.18).



Рисунок – 3.17 Модуль дискретного вводу I-7041



Рисунок – 3.18 Блок живлення PSP-1000-24

Блок живлення RS-25-12 (рисунок 3.19) з напругою живлення від 100В до 240В призначений для видачі стабілізованої напруги 12В постійного струму для живлення модуля I-7041.



Рисунок – 3.19 Блок живлення RS-25-12

Сигнали з ІВК та модулів I-7041 потрапляють на вхід промислових комп'ютерів DA-681A-I-DPPV1.0.0 (рисунок 3.20) (Intel Core Celeron 1047UE 1.4ГГц, ОЗУ-8ГБ DDR3, VGA, 6 LAN, 2 RS-232, 10 RS-485, mSATA, SATA, USB). по інтерфейсу RS-485, де відбувається обробка сигналів та архівування даних, відображення поточних значень відбувається на екрані консолі АМК 801-19UB (консоль для 19" стойки, 19" TFT LCD монітор, клавіатура, VGA/KB/Mouse, 1 порт PS2 KVM, Touchpad).



Рисунок – 3.20 Промисловий комп'ютер MOXA DA-681A-I-DPP

За допомогою комутатора D-Link DKVM-4U (рисунок 3.21) через USB підключається клавіатура консолі та відбувається перемикання відеосигналів від промислових комп'ютерів.



Рисунок – 3.21 Комутатор D-Link DKVM-4U

Вихідний сигнал по кабелю за протоколом Ethernet потрапляє до медіа-конвертеру ІМС-101-М-SC (Ethernet 10/100BaseTX в 100BaseFX) (рисунок 3.22), де відбувається його перетворення в оптичний сигнал, який в подальшому через оптичну патч-панель 1U24 (рисунок 3.23) передається в промислову комп'ютерну мережу.



Рисунок – 3.22 Медіа-конвертер ІМС-101-М-SC



Рисунок – 3.23 Оптична патч-панель 1U24

Блок живлення DR-120-24 (рисунок 3.24) призначений для видачі стабілізованої напруги 24В постійного струму для живлення медіа-конвертерів.



Рисунок 3.24 – Блок живлення DR-120-24

У розділі 3 була визначена мета та призначення розробки системи дистанційного контролю зусиль в арматурних канатах системи переднапруження захисної оболонки; розроблені схеми цифрового тензометричного датчика, розроблений пристрій контролю попереднього напруження датчика; визначені кількість та тип та розміщення температурних датчиків; спроектовано канал передачі даних; визначена апаратура обробки даних що надходять від датчиків; розроблена схема

живлення та структура СДКЗ АК СПЗО; визначені технічні засоби які в комплексі реалізують технічні вимоги що пред'являються до функцій системи.

4 ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИСТЕМИ ДИСТАНЦІЙНОГО КОНТРОЛЮ ЗУСИЛЬ АРМАТУРНИХ КАНАТІВ

4.1 Вимоги до програмного забезпечення СДКЗ АК СПЗО

Згідно технічним вимогам програмне забезпечення СДКЗ повинне забезпечувати:

- безперервний дистанційний контроль (автоматичне вимірювання, індикацію та реєстрацію) величини зусиль натягу армоканатів в режимі реального часу з архівацією даних;
- збір, оброблення, документування та збереження інформації в поточному режимі не менше 1 року, створення архіву вимірних зусиль в армоканатах на виносній пам'яті не менше, як за 4 роки;
- формування повідомлень персоналу про необхідність натягу армоканату, відображення допустимих граничних значень зусиль натягу армоканатів (уставки аварійної сигналізації), повідомлення про вихід зусиль натягу армоканатів за допустимі границі;
- контроль зусиль натягу армоканата в зоні силовимірювання та настройка ВК СДКЗ;
- забезпечення калібрування датчиків;
- управління роботою системи в робочому режимі та в режимі калібрування;
- обчислення зусиль натягу канатів за інформацією, що отримується від датчиків сили;
- перевірку та діагностику працездатності системи в цілому та кожного окремого датчика контролю зусиль натягу армоканату, тестування програмного забезпечення з видачою відповідних протоколів;
- оновлення та доповнення баз даних за запитом;
- можливість видачі інформації (графіки, таблиці) за будь-який визначений період (день, тиждень і т.п.);

- можливість порівняльного аналізу зусиль натягу армоканатів методом накладання графіків і таблиць заданої кількості армоканатів за визначений період;
- конвертацію всієї інформації за вимогою по працездатності армоканатів в Excel;
- можливість виведення всієї інформації за вимогою на друк без додаткових перетворень:
- можливість видачі даних у зовнішні системи;
- забезпечення індивідуальним паролем доступу оператора.

4.2 Програмне забезпечення мікроконтролера цифрового тензометричного датчика.

При проєктуванні ЦТД було обрано мікроконтролер HX111 що являє собою 24-бітний аналогово - цифровий перетворювач, який призначений для зв'язування мостових датчиків ваги напряму з програмним забезпеченням промислового контролю. Нижче наведені приклади програмування на мові Assembly та C.

Reference Driver (Assembly)

```

/*-----
Call from ASM: LCALL ReaAD
Call from C: extern unsigned long ReadAD(void);
        .
        unsigned long data;
        data=ReadAD();
        .
-----*/

PUBLIC ReadAD
HX711ROM segment code
rseg HX711ROM
sbit ADDO = P1.5;
sbit ADSK = P0.0;
/*-----
OUT: R4, R5, R6, R7 R7=>LSB
-----*/

ReadAD:
        CLR     ADSK           //AD Enable (PD_SCK set low)
        SETB   ADDO           //Enable 51CPU I/O
        JB     ADDO,$         //AD conversion completed?
        MOV    R4,#24
ShiftOut:
        SETB   ADSK           //PD_SCK set high (positive pulse)

```

```

NOP
CLR   ADSK           //PD_SCK set low
MOV   C,ADDO        //read on bit
XCH  A,R7           //move data
RLC  A
XCH  A,R7
XCH  A,R6
RLC  A
XCH  A,R6
XCH  A,R5
RLC  A
XCH  A,R5
DJNZ R4,ShiftOut   //moved 24BIT?
SETB ADSK
NOP
CLR  ADSK
RET
END

```

Reference Driver (C)

```

//-----
sbit  ADDO = P1^5;
sbit  ADSK = P0^0;
unsigned long ReadCount(void){
    unsigned long Count;
    unsigned char i;
    ADDO=1;
    ADSK=0;
    Count=0;
    while(ADDO);
    for (i=0;i<24;i++){
        ADSK=1;
        Count=Count<<1;
        ADSK=0;
        if(ADDO) Count++;
    }
    ADSK=1;
    Count=Count^0x800000;
    ADSK=0;
    return(Count);
}

```

4.3 Розробка алгоритму розрахунку зусиль з врахуванням температурної компенсації

Алгоритм роботи фрагменту програми реалізовано за допомогою мови функціональних блокових діаграм (FBD) (рисунок 4.1). Завдання полягає в розрахунку дійсної сили натягу арматурного канату з урахуванням температурної компенсації, яку треба враховувати внаслідок теплової деформації гільзи анкерного пристрою та елементів

вимірювальної ділянки.

Вихідні дані:

T_s – значення температури навколишнього середовища на південній частині гермооболонки реакторного відділення;

a_1 , b_1 , – експериментально визначені коефіцієнти компенсації теплового розширення гільзи анкерного пристрою при температурі вище $25\text{ }^{\circ}\text{C}$;

a_2 , b_2 – експериментально визначені коефіцієнти компенсації теплового стискання гільзи анкерного пристрою при температурі нижче $20\text{ }^{\circ}\text{C}$;

F_1 – значення зусилля, виміряного тензодатчиком який встановлено на гільзі анкерного пристрою;

F_{\min} – мінімально допустиме значення натягу арматурного канату;

F_{\max} – максимально допустиме значення натягу арматурного канату.

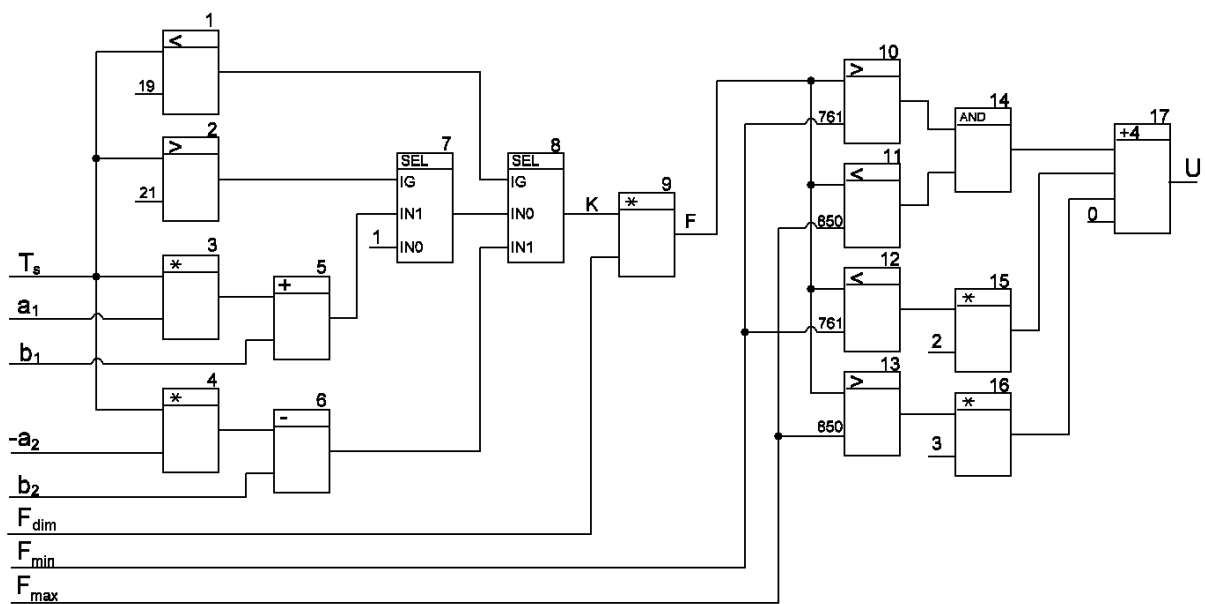


Рисунок 4.1 – Алгоритм розрахунку зусиль з врахуванням температурної компенсації

При складанні алгоритму були використані набори блоків математичних операцій блоки порівняння та блоки логіки. Сигнал T_s , на ділянці схеми температурної компенсації, подається на перші входи

блоків порівняння (1), (2) та блоків множення (3) (4). На другий вхід елементів порівняння подаються відповідні значення уставок. На блок (1) – значення 19, на блок (2) значення 21. На виході блоків порівняння формується змінна BULL, яка може мати значення false «0» або true «1». На виході блоку множення (3) формується значення a_1T_s , на виході блоку суми (5) формується значення коефіцієнта температурної компенсації « $a_1T_s+b_1$ ». Аналогічно формується значення коефіцієнта температурної компенсації на виході блоку віднімання (6) « $a_2T_s-b_2$ ». В блоці порівняння (7) якщо на перший вхід подається значення false «0», то на виході формується значення, яке маємо на вході IN0, якщо на першому вході значення true «1», то на виході формується значення, яке маємо на вході IN1. Аналогічні операції відбуваються на другому блоці вибору (8), на виході якого отримуємо значення коефіцієнту температурної компенсації (K). В результаті множення коефіцієнту K на значення виміряного зусилля F_{dim} отримуємо дійсне значення величини зусилля F яке в подальшому відображається на екрані монітору. Для формування повідомлення про вихід значень натягу арматурного каната за границі уставок використовується кольорова сигналізація. Значення F аналізується в схемі сигналізації, де за результатами аналізу вихідним даним програмою присвоюється відповідна сигналізація в вигляді зміни кольору комірки в котрій відображається значення зусиль натягу. Алгоритм роботи схеми сигналізації наступний: розраховане значення F подається на перші входи блоків порівняння (10), (11), (12), (13), на другі входи блоків [10], [12] задаються значення нижньої уставки, на другі входи блоків (11), (12) задаються значення верхньої уставки. В блоці (10) якщо $F > 761$, то на виході маємо «1», в іншому випадку «0». Аналогічні порівняння відбуваються в інших блоках порівняння. В блоках множення (14), (15), (16) відбувається множення вхідних значень. В результаті логічних операцій на входах блоку суми можуть бути такі значення: $vx_1 = \text{«0»}$ або «1», $vx_2 = \text{«0»}$ або «2», $vx_3 = \text{«0»}$ або «3», $vx_4 = \text{«0»}$. В процесі

додавання вхідних значень на виході отримуємо одне з трьох значень – «1» (сигнал нормальної експлуатації), «2» (сигнал нижче уставки), «3» (сигнал вище уставки). В подальшому, використовуючи ці значення, програма змінює колір комірок в яких відображається значення зусилля натягу арматурних канатів (1 - зелений, 2 – червоний, 3 – жовтий).

4.4 Розробка графічного інтерфейсу

На головному вікні програми «Дистанційний контроль зусиль натягу армоканатів» (рисунок 4.2) відображаються вкладки для переходу в режими налаштування, калібрування, для перегляду неконтролюємих канатів, стрибків показань (більше 20 тс), довідка та величини зусиль арматурних канатів, кольорова сигналізація виходу зусиль за межі уставок.

Канат	01AK	069	09AK	044	17AK	762	25AK	783	33AK	811	45AC	832	61AC	765	77AC	809	94AC	858
01AC	841	09AC	848	17AC	790	25AC	842	33AC	860	45BC	833	61BC	825	77BC	824	94BC	837	
01BK	840	09BK	851	17BK	766	25BK	747	33BK	821	46AC	791	62AC	772	78AC	870	95AC	803	
01BC	819	09BC	822	17BC	776	25BC	860	33BC	864	46BC	845	62BC	839	78BC	855	95BC	817	
02AK	782	10AK	832	18AK	818	26AK	839	34AK	781	47AC	828	63AC	812	79AC	803	96AC	819	
02AC	805	10AC	805	18AC	837	26AC	868	34AC	765	47BC	822	63BC	796	79BC	828	96BC	777	
02BK	783	10BK	823	18BK	831	26BK	837	34BK	741	48AC	853	64AC	863	80AC	852			
02BC	811	10BC	845	18BC	843	26BC	874	34BC	817	48BC	857	64BC	859	80BC	815			
03AK	760	11AK	814	19AK	818	27AK	830	35AK	820	49AC	814	65AC	823	81AC	825			
03AC	823	11AC	844	19AC	773	27AC	862	35AC	848	49BC	814	65BC	788	81BC	811			
03BK	754	11BK	809	19BK	839	27BK	841	35BK	787	50AC	845	66AC	793	82AC	872			
03BC	791	11BC	802	19BC	874	27BC	846	35BC	847	50BC	850	66BC	826	82BC	872			
04AK	804	12AK	837	20AK	811	28AK	858	36AK	759	51AC	838	67AC	783	83AC	847			
04AC	785	12AC	834	20AC	864	28AC	874	36AC	864	51BC	832	67BC	788	83BC	869			
04BK	797	12BK	833	20BK	795	28BK	849	36BK	870	52AC	828	68AC	797	84AC	836			
04BC	843	12BC	830	20BC	737	28BC	864	36BC	811	52BC	794	68BC	769	84BC	818			
05AK	807	13AK	828	21AK	805	29AK	855	37AK	874	53AC	784	69AC	794	85AC	859			
05AC	838	13AC	852	21AC	843	29AC	863	37AC	806	53BC	804	69BC	833	85BC	862			
05BK	807	13BK	837	21BK	834	29BK	847	38AC	826	54AC	867	70AC	787	86AC	817			
05BC	833	13BC	841	21BC	848	29BC	874	38BC	821	54BC	819	70BC	816	86BC	856			
06AK	787	14AK	847	22AK	791	30AK	810	39AC	824	55AC	841	71AC	782	88AC	811			
06AC	815	14AC	825	22AC	870	30AC	827	39BC	810	55BC	863	71BC	780	88BC	800			
06BK	801	14BK	791	22BK	807	30BK	800	40AC	827	56AC	838	72AC	803	89AC	800			
06BC	825	14BC	806	22BC	872	30BC	836	40BC	875	56BC	815	72BC	830	89BC	808			
07AK	812	15AK	782	23AK	822	31AK	785	41AC	817	57AC	819	73AC	783	90AC	822			
07AC	817	15AC	855	23AC	875	31AC	765	41BC	799	57BC	810	73BC	799	90BC	802			
07BK	824	15BK	770	23BK	807	31BK	804	42AC	823	58AC	849	74AC	802	91AC	856			
07BC	862	15BC	828	23BC	839	31BC	766	42BC	843	58BC	872	74BC	819	91BC	842			
08AK	786	16AK	799	24AK	802	32AK	841	43AC	840	59AC	877	75AC	853	92AC	816			
08AC	806	16AC	842	24AC	808	32AC	793	43BC	854	59BC	820	75BC	821	92BC	800			
08BK	791	16BK	791	24BK	846	32BK	830	44AC	830	60AC	852	76AC	773	93AC	820			
08BC	827	16BC	839	24BC	851	32BC	851	44BC	874	60BC	786	76BC	779	93BC	824			

НОРМА МЕНЬШЕ БОЛЬШЕ ВНЕ УСТАВОК ЕД. КОДА КОРТОКЕ ЗАМЫКАНИЕ

Уставки: нагрузка (тс): max = 875, min = 739, maxCyl = 875, minCyl = 761, нагрузка (ед. кода): max = 10, min = 0, величина нестабильности (тс): 1

Рисунок 4.2 – Головне вікно програми «Дистанційний контроль зусиль натягу армоканатів»

В процесі роботи програма здійснює самодіагностику системи та в разі відмови будь якого елементу системи з ладу (датчики, АЦП, блоки живлення, модулі ICP-CON, COM-порти) на головному вікні програми з'являються повідомлення про відмову елементів системи (рисунок 4.3).

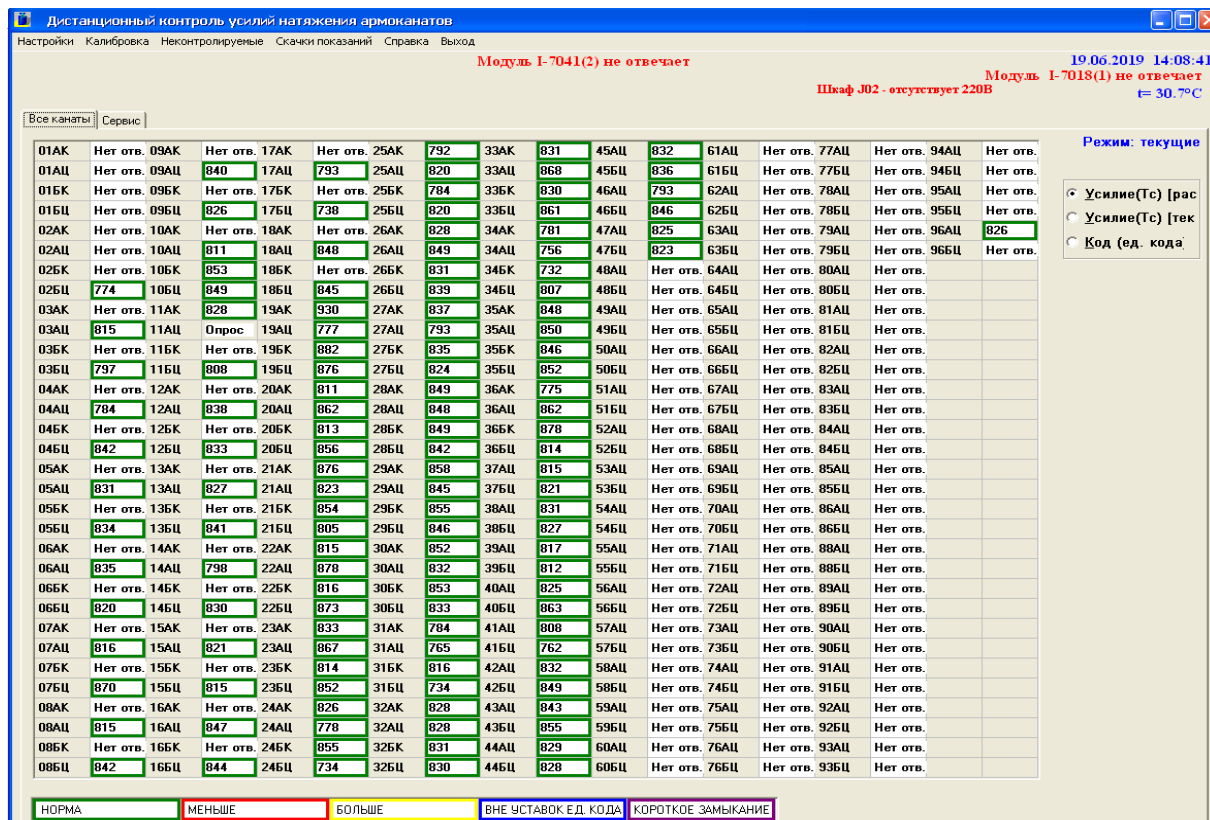


Рисунок 4.3 – Відображення повідомлень про несправності.

На вкладці «Сервис» можна вибрати до восьми арматурних канатів та переглянути ретроспективні значення зусиль, та температури навколишнього середовища за будь який період експлуатації системи. Інформація надається у текстовому та графічному вигляді (рисунок 4.4).

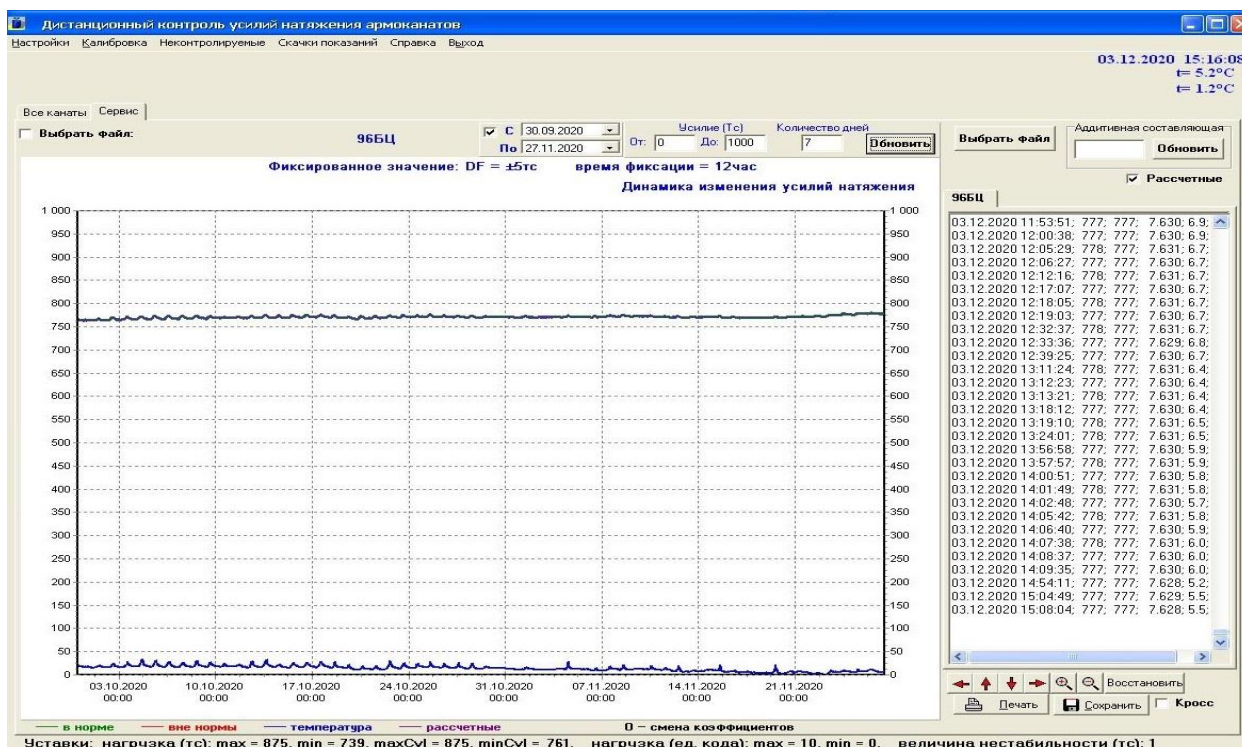


Рисунок 4.4 – Відображення ретроспективних значень величин зусиль натягу арматурних канатів та температури.

На вкладці «Настройки» є можливість налаштувати COM - порти, адреси модулів ICP-CON, а також уставки спрацювання сигналізації.

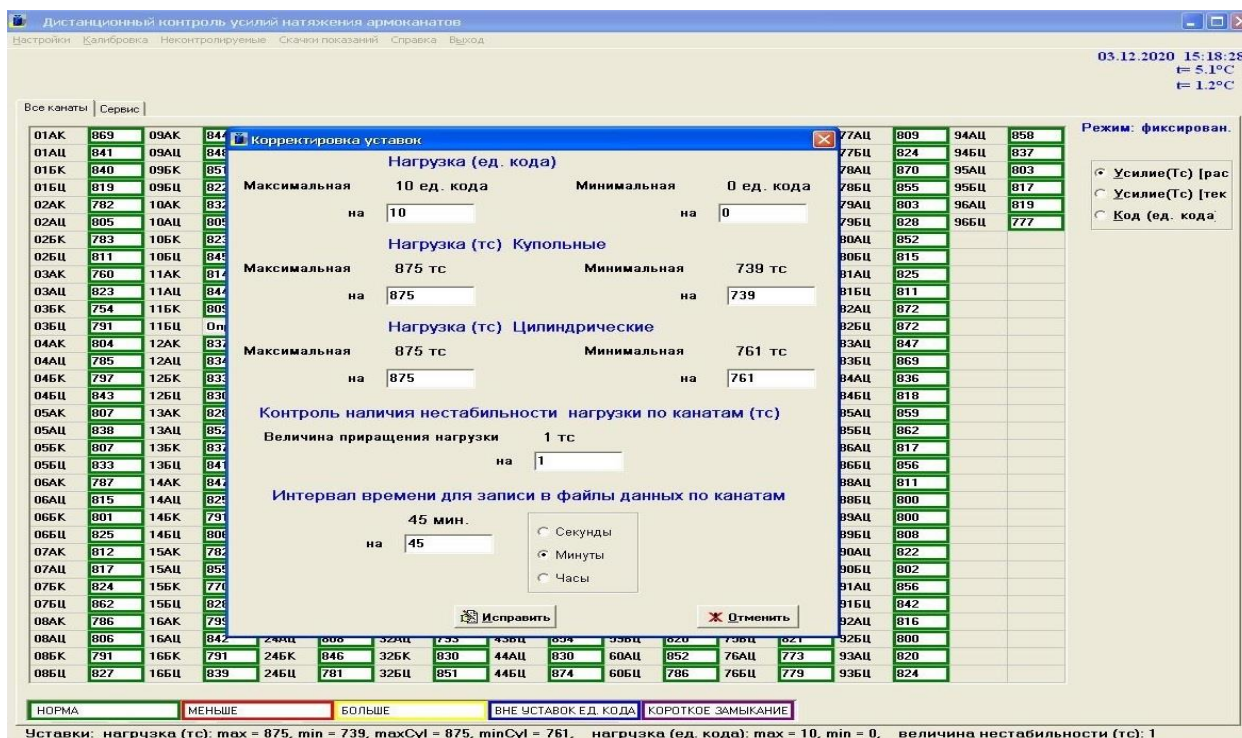


Рисунок 4.5 – Відображення вікна коректування уставок

У розділі 4 було розглянуто вимоги до програмного забезпечення; розроблене програмне забезпечення мікроконтролера цифрового тензOMETричного датчика; розроблений алгоритм розрахунку зусиль з врахуванням температурної компенсації за допомогою графічної мови програмування ПЛК за допомогою функціональних блокових діаграм (FBD); розроблений графічний інтерфейс програми дистанційного контролю зусиль арматурних канатів.

5. ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНЕ ОБҐРУНТУВАННЯ ЗАПРОПОНОВАНИХ РІШЕНЬ

Аналізуючи структурні схеми систем дистанційного контролю зусиль арматурних канатів що в даний час експлуатуються на Запорізькій АЕС (додаток В) та модернізовану структурну схему (додаток Д), яку було розроблено за новим технічним рішенням, а саме заміна аналогових силовимірювальних датчиків цифровими. Можна відмітити що в розробленій структурній схемі відсутні 33 аналогово-цифрові перетворювачі, та змінена схема підключення силовимірювальних датчиків. Завдяки прийнятому рішенню виключення зі структурної схеми АЦП (вартість одного АЦП 25000 грн.) виключає також витрати на будівництво та монтаж сейсмостійких металоконструкцій призначених для встановлення АЦП на стінах циліндричної частини захисної оболонки.

Згідно локального кошторису «№ 2-4-1/с на будівельні роботи (конструкції металеві)» кількість витраченого металу на виготовлення чотирьох сейсмостійких металоконструкцій наведено в таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 – Витрати металу на виготовлення металоконструкцій

Назва частин металоконструкцій	Вага, т
Стелажі	0,2802
Майданчики з настилом та огорожею з листової, рифленої, просічної та круглої сталі	4,1612
Сходи	0,187254
Опорні конструкції	1,102718
Кровельне покриття	0,06
Разом:	5,791372

Вартість будівельних робіт на виготовлення та монтаж металоконструкцій згідно вказаного кошторису наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Вартість будівельних робіт на виготовлення та монтаж металоконструкцій

Найменування витрат	Одиниці вимірювання	Значення
Будівельні роботи	тис. грн.	331,953
в тому числі:		
вартість матеріалів, виробів та конструкцій	тис. грн.	268,719
трудомісткість у будівельних роботах	люд.-г.	1, 37725
заробітна плата у будівельних роботах	тис. грн.	46,950
середній розряд робіт		4
Загальновиробничі витрати	тис. грн.	23,441
трудомісткість у загальновиробничих витратах	люд.-г.	140,46
заробітна плата у загальновиробничих витратах	грн.	7406
Всього	тис. грн.	355,394

Згідно локального кошторису «№ 2-4-5/к на монтажні роботи (автоматика технологічна)» витрати на закупівлю та монтаж кабельної продукції на покрівлі реакторного відділення енергоблоку відображено в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Загальні витрати на монтаж кабельної продукції в системі СДКУ-1000

Найменування витрат	Одиниці вимірювання	Значення
МКЭШнг 4x0,35 (8948м)	грн	189160,72
КПВонг-НФЭ-ВП 4x2x0,51 (435м)	грн	6751,20
КВВГнгд 4x1,5 (435м)	грн	7395,00
Трудомісткість у монтажних роботах,.	люд.-г	6534,02
Заробітна плата у монтажних роботах	грн.	252 432,00
Всього	грн.	417972,92

Загальна вартість на монтаж кабельної продукції в системі що розробляється (СДКЗ АК СПЗО) наведена в таблиці 5.4.

Таблиця 5.3 – Загальні витрати на монтаж кабельної продукції в системі
СДКЗ АК СПЗО

Найменування витрат	Одиниці вимірювання	Значення
КПВонг-НФЭ-ВП 4х2х0,51 (900м)	грн.	11640,00
КВВГнгд 4х2,5 (506м)	грн.	19228,00
Трудовісткість у монтажних роботах, люд.-г.	люд.-г.	1887,26
Заробітна плата у монтажних роботах, грн.	грн.	72905
Всього, грн.		106101,00

Складемо порівняльну таблицю вищерозглянутих витрат з врахуванням вартості електротехнічного обладнання (таблиця 5.4).

Таблиця 5.4 – Порівняльна таблиця витрат

Витрати	Од.вим.	СДКУ-1000	СДКЗ АК СПЗО
Металоконструкції,	грн.	355394	–
Трудовісткість у будівельних роботах та загальнопромислових витратах	люд.-г.	1517,71	–
АЦП	грн.	825000	–
Загальна заробітна плата у будівельних роботах	грн.	54356	–
Силівимірювальні датчики (264 шт.)	грн.	3168000	3960000
Модулі I-7041	грн.	4472	29068
Модулі I-7520	грн.	3952	–
Модулі I-7520	грн.	11036	22072
Термопара Р3410	грн.	160	320
Загальні витрати на монтаж кабельної продукції, грн.	грн.	417973	103773

Продовження таблиці 5.4

Трудомісткість у монтажних роботах	люд.-г.	6534,02	1895,26
Заробітна плата у монтажних роботах	грн.	252432	73220
Трудомісткість всього	люд.-г.	8051,73	1895,26
Вартість всього,	грн.	5092775	4191096

Порівнюючи отримані результати можна зробити висновок що економія витрат на будівництві, монтажі та закупівлях продукції, що встановлюється на захисній оболонці реакторного відділення енергоблоку, складає 901679 грн. (17,71%), трудомісткість скорочується на 6156,47 люд.-г. (76,46%).

ВИСНОВКИ

Метою кваліфікаційної для здобуття ступеня вищої освіти магістра є розробка та дослідження системи дистанційного контролю зусиль в арматурних канатах системи переднапруження захисної оболонки з метою підвищення безпеки експлуатації АЕС шляхом впровадження моніторингу за динамікою зусиль натягу арматурних канатів, за рахунок сучасних засобів автоматизації та комп'ютерно інтегрованих технологій.

1. Виконано аналіз особливостей використання захисних оболонок для енергоблоків ВВЕР-1000 з реакторною установкою В-320.

2. Виконано аналіз діючих систем дистанційного контролю зусиль арматурних канатів системи переднапруження захисної оболонки СДКУ-1000 та СИУ, що розроблені відповідно МП ООО ТНПЦ «ТОМ» м. Одеса та ПАО «Контрольприбор» м. Пенза. Розглянуті системи будуються на основі багаторівневих систем, які включають силовимірювальні та температурні датчики, контролери, перетворювачі та сервери на основі промислових комп'ютерів.

3. Розглянуто можливість використання математичного підходу на базі методу скінченних елементів для аналізу стану захисної оболонки до складу якої входять арматурні канати. Розрахунки виконані у середовищі MatLab і Excel дозволили розробити алгоритм температурної компенсації теплового розширення елементів вимірювальної ділянки, та розрахувати коефіцієнти температурної компенсації для програмної обробки даних. Розроблений алгоритм дозволив підвищити точність розрахунків в 8,5 разів.

4. Розроблено схему цифрового тензометричного датчика з функцією калібрування та лінеаризації вихідних даних на основі тензорезисторного датчика фірми Zemic розрахованого на навантаження 50кг – НЗ-СЗ-50kg-3В. Вихідний сигнал з датчика здійснюється за протоколом RS-485.

5. Розроблено пристрій контролю попереднього напруження датчика який дозволяє підвищити зручність та скоротити час технічного обслуговування датчиків на 30%.

6. Визначені кількість та місця монтажу силовимірювальних та температурних датчиків. В роботі наведено схеми розміщення датчиків на гільзах анкерних пристроїв арматурних канатів.

7. Розроблено схему інформаційно-вимірювального каналу, детально розкрито структурну схему системи дистанційного контролю зусиль арматурних канатів системи переднапруження захисної оболонки.

8. Визначено технічні засоби які в комплексі реалізують технічні вимоги що пред'являються до функцій системи та відповідають експлуатаційним характеристикам.

9. Графічний інтерфейс розроблений з урахуванням технічних вимог та дозволяє оперативно отримувати інформацію про поточні значення зусиль натягу арматурних канатів; отримувати діагностичні дані працездатності технічних засобів системи; налаштувати COM-порти, адреси модулів ICP CON та уставки спрацювання сигналізації; отримувати ретроспективні дані архіву та будувати графіки зусиль обраних арматурних канатів за будь який проміжок часу.

10. Структурна схема, що розроблена в даній роботі, в порівнянні з існуючими, дозволяє скоротити витрати на монтаж системи завдяки зменшенню кабельної продукції. Виключення з проєктів аналого-цифрових перетворювачів та призначених для їх монтажу сейсмостійких металоконструкцій зменшує трудомісткість та загальний час необхідний для монтажу системи.

11. Розроблена система дистанційного контролю зусиль АК СПЗО дозволяє безперервно контролювати стан арматурних канатів та захисної оболонки яка є складовою частиною локалізуючої системи безпеки АЕС що призначена для запобігання або обмеження розповсюдження радіоактивних

речовин і випромінювань, що виділяються при аваріях, за встановлені проєктом межі та виходу їх у навколишнє середовище.

12. За результатами розрахунків ТЕП отримано, що запропонований підхід реалізації системи дозволить скоротити витрати на 901679 грн. (17,71%), скоротити трудомісткість на 6156,47 люд.-г. (76,46%) в порівнянні з аналогічними системами.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

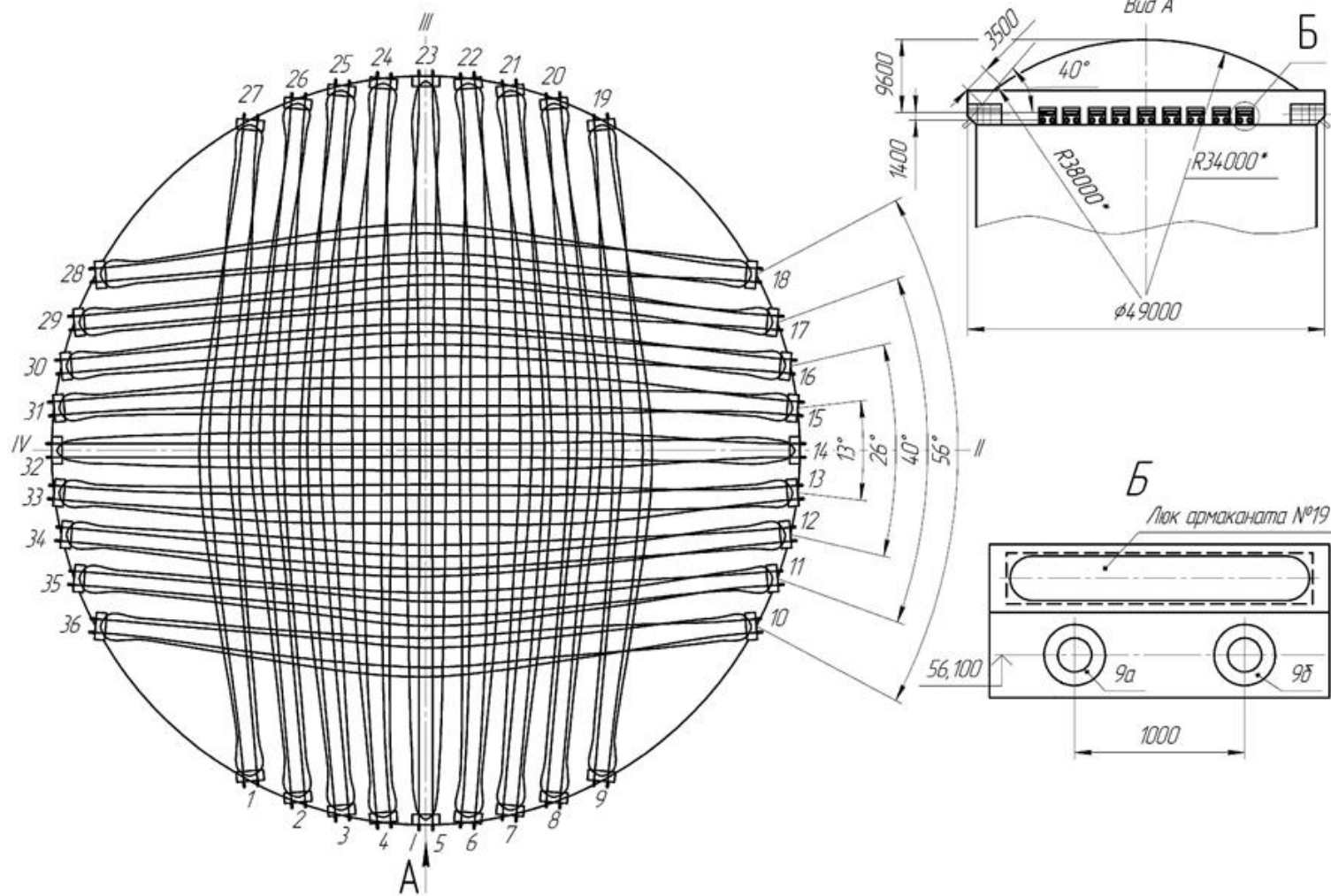
1. Загальні положення безпеки атомних станцій. НП 306.2.141-2008: затверджений та ведений у дію наказом Державного комітету ядерного регулювання України від 19.11.2007 № 162. Офіційне видання. Київ, 2008. 58 с.
2. ДП "НАЕК "ЕНЕРГОАТОМ". Нефінансовий звіт 2020 URL: www.energoatom.com.ua/uploads/2020/Нефінансовий%20звіт%202020.pdf (дата звернення: 30.09.2021).
3. Стратегічний план розвитку ДП «НАЕК «ЕНЕРГОАТОМ» на 2020-2024 роки. URL: <http://www.energoatom.com.ua/ua/about-6/misia-7> (дата звернення: 05.10.2021).
4. Комплексная (сводная) программа повышения безопасности энергоблоков АЭС Украины. Киев 2010 URL: www.npp.zp.ua/sites/default/files/unmanaged/safety/upgrade/docs/KsPPB_p1.pdf (дата звернення: 08.10.2021).
5. Основное оборудование реакторного отделения. Министерство РФ по атомной энергии. Концерн «Росатом». Балаковская АЭС. Служба подготовки персонала. 186 с.
6. Резепов В. К., Денисов В. П., Кирилюк Н. А., Драгунов Ю. Г., Рыжов Ю. Б. Реакторы ВВЭР-1000 для атомных электростанций. Подольск: ОКБ «Гидропресс», 2004. 333 с.
7. Тевлин С. А. Атомные электрические станции с реакторами ВВЭР-1000. – М.: Издательство МЭИ, 2002. 344 с.
8. IAEA Safety Standards for protecting people and the environment. Safety of Nuclear Power Plants: Design/ Specific Safety Requirements No.SSR-2/1 URL: <https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1715web-46541668.pdf> (дата звернення: 15.10.2021).
9. Пергаменщик Б.К. Возведение специальных защитных конструкций АЭС. М.: Издательский дом МЭИ, 2011. 240 с.

10. Воронин Л. М. Особенности проектирования и сооружения АЭС. М.: Атомиздат, 1980. 192 с.
11. Коробов Л.А. Железобетонные пространственные конструкции атомных и тепловых электростанций. М.: Энергоиздат, 1981. 328 с.
12. Строительство атомных электростанций / под ред: В. Б. Дубровского. М.: Энергоатомиздат, 1987. 248 с.
13. Инструкция по эксплуатации локализирующих систем безопасности: 123456.РО.ХА.ИЭ.22-19.
14. НАКАЗ №140 від 03.04.2018 «Про затвердження Правил улаштування та безпечної експлуатації локалізуючих систем безпеки» URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0534-18#Text> (дата звернення: 19.10.2021).
15. Система дистанционного контроля усилий СДКУ-1000. Техническое описание и руководство по эксплуатации СДКУ-1000.Z11.001 РЭ.
16. Система измерения усилий армоканатов «СИУ». Руководство по эксплуатации МЛВР.411711.007 РЭ.
17. В. В. Карпов, А. А. Семенов, Математические модели и алгоритмы исследования прочности и устойчивости оболочечных конструкций, Сиб. журн. индустр. матем., 2017, том 20, номер 1, с. 53–65. URL: <http://www.mathnet.ru/links/cc692b4629f0da3ea92fc6b52a950118/sjim948.pdf> (дата звернення: 01.11.2021).
18. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов АЭУ (ПНАЭ Г-7-002-89). URL: <https://docs.cntd.ru/document/1200037730> (дата звернення: 03.11.2021).
19. О. В. Гондлях, В. І. Сівецький, В. Ю. Щербина, А. О. Чемерис, В. Ю. Онопрієнко. САПР. Система інформаційної підтримки життєвого циклу захисних оболонок та обладнання АЕС/ К. : НТУУ «КПІ», 2014. 190 с.
20. Type B3G Load Cell. URL: https://www.zemiceurope.com/media/Documentation/B3G_Datasheet.pdf (дата звернення: 15.11.2021).

21. MC34063AB, MC34063AC, MC34063EB, MC34063ECDC-DC. Converter control circuits. URL: <https://www.st.com/resource/en/datasheet/mc34063ec.pdf> (дата звернення: 18.11.2021).
22. I-7017, I-7018, I-7019, M-7017, M-7018 and M-7019 Series User Manual. URL: http://ftp.icpdas.com/pub/cd/8000cd/napdos/7000/manual/7017-18-19_english.pdf (дата звернення: 19.11.2021).
23. RS-422 and RS-485 Application Note. URL: <https://www.cpii.com/docs/library/4/485appnote.pdf> (дата звернення: 20.11.2021).
24. ICP-DAS RS-422/485 Repeaters URL: https://www.icpdas.com/root/product/solutions/datasheet/industrial_communication/I-7510_I-7510A_I-7510AR_I-7510P.pdf (дата звернення: 21.11.2021).

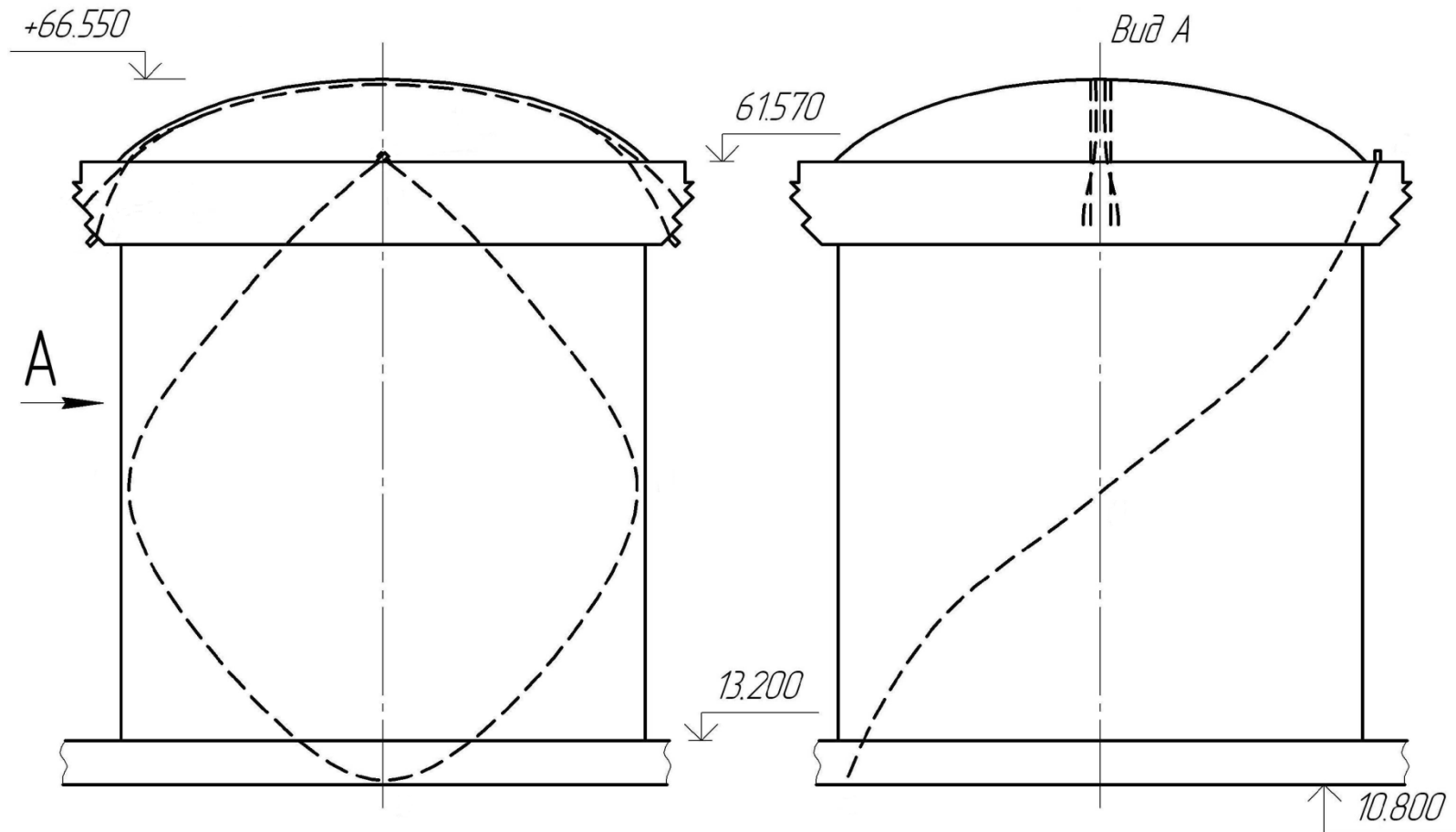
ДОДАТОК А

СХЕМА РОЗМІЩЕННЯ АРМАТУРНИХ КАНАТІВ КУПОЛЬНОЇ ЧАСТИНИ ЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКИ



ДОДАТОК Б

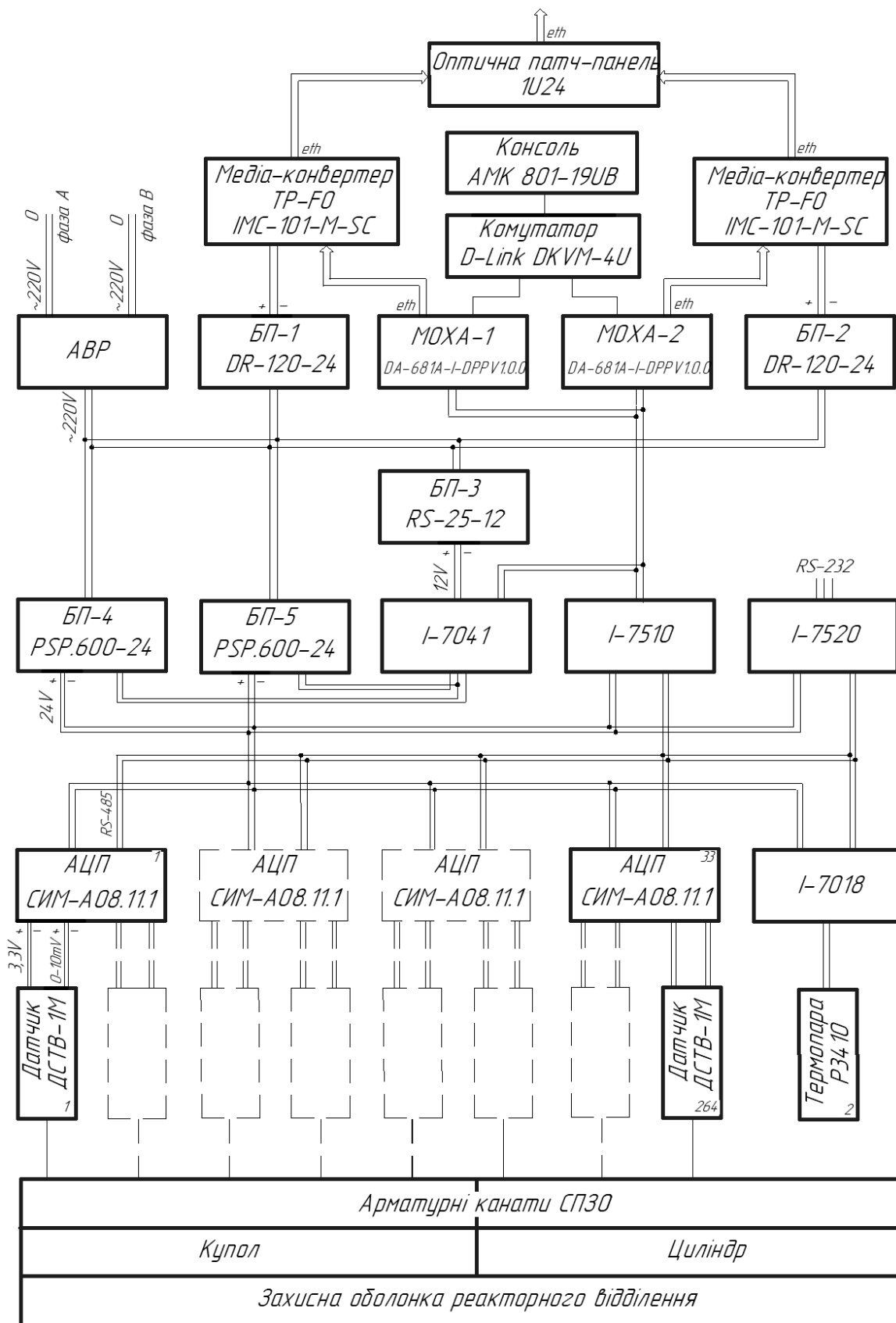
СХЕМА РОЗМІЩЕННЯ АРМАТУРНИХ КАНАТІВ ЦИЛІНДРИЧНОЇ ЧАСТИНИ ЗАХИСНОЇ ОБОЛОНКИ



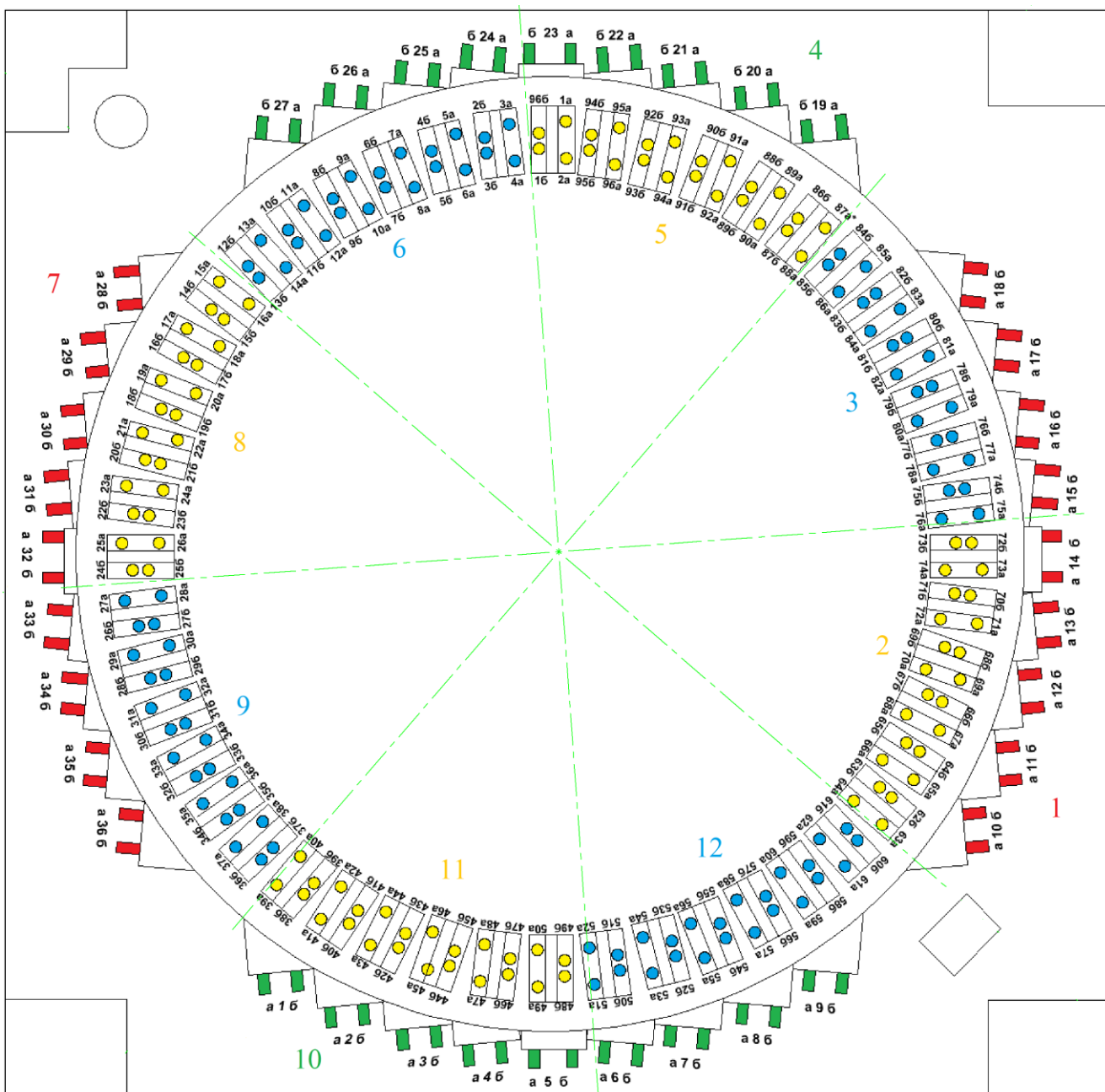
Примітка: Пунктирною лінією показано два арматурних каната купольної частини та два арматурні канати циліндричної частини захисної оболонки.

ДОДАТОК В

СТРУКТУРНА СХЕМА СДКУ-1000



ДОДАТОК Г СХЕМА РОЗМІЩЕННЯ ДАТЧИКІВ



ДОДАТОК Д

СТРУКТУРНА СХЕМА СДКЗ АК СПЗО

